



**Centro de Investigación en Alimentación
y Desarrollo, A. C.**

**PROCESAMIENTO DE GRANOS PARA LA ELABORACIÓN
DE PAN MULTIGRANO Y ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE
GLUCÉMICO *in vitro***

Por:

ALEJANDRA ZAGNITE ARANA NAVARRO

TESIS APROBADA POR LA:

COORDINACIÓN DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en esta tesis es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita del Director General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director de tesis.



Dr. Pablo Wong González

Director General

APROBACIÓN

Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Alejandra Zagnite Arana Navarro, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias.



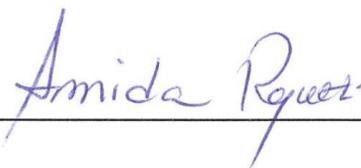
Dra. Alma Rosa Islas Rubio

Director de Tesis



Dra. Ana María Calderón de la Barca

Asesor



M.C. Armida Rodríguez Félix

Asesor



Dr. René Renato Balandrán Quintana

Asesor

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico prestado, al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) por ser mi casa de estudios durante estos dos años de posgrado, a la Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal (CTAOV) por brindar su apoyo de infraestructura y equipos.

A Dios por brindarme la vida y la oportunidad de vivir esta experiencia. A mis papás por su incondicional amor y apoyo, por sus consejos siempre tan asertivos y sabios, por la formación que me dieron, los valores que sembraron en mí y por ser exactamente quienes son. A mi hermano por todo el amor y el apoyo que siempre me ha dado, por escucharme y estar siempre a mi lado. Especialmente quiero agradecer a mis tíos Enriqueta Hernández y José Ignacio Oviedo por el increíble apoyo que me dieron durante este último año, por su consejo, su cuidado, atenciones y servicio. Por escucharme, por todo su cariño y por hacerme sentir en casa.

A mi comité de tesis: Dra. Ana María Calderón de la Barca por el apoyo brindado tanto como revisora como en el desarrollo técnico del trabajo, abriéndome las puertas de su laboratorio. Además por haber compartido sus conocimientos como maestra en clase de Nutrición y la atención personalizada otorgada durante los dos años. A la M.C. Armida Rodríguez por su apoyo como revisora de tesis, sus atenciones, por ser siempre tan asertiva, concisa y constructiva en sus comentarios y observaciones durante el desarrollo del trabajo pero sobre todo por su excelente actitud y apoyo moral.

Al Dr. René Balandrán por el apoyo brindado como revisor del trabajo de tesis, por sus observaciones y comentarios que siempre fueron constructivos y positivos. Agradezco a la Dra. Alma Rosa Islas, por aceptarme como su estudiante de tesis, por su apoyo como revisora, como consejera y hasta técnico. Por compartirme su tiempo y sus

conocimientos no sólo científicos sino de vida también. Por escucharme y apoyarme en mis ideas y mis decisiones durante el desarrollo del proyecto y por la confianza y la amistad brindada. A los técnicos de laboratorio: Q.B. Ma. del Carmen Granados N. por todo el apoyo técnico brindado durante el desarrollo del proyecto, por compartir sus conocimientos técnicos y científicos, por buscar siempre cómo solucionar los problemas de forma sencilla y facilitarme las cosas. Por escucharme y aconsejarme en cuestiones del proyecto y de vida. Por tenerme paciencia y por la confianza y amistad brindada, por todo el cariño y todas las cosas que vivimos juntas y que compartimos durante estos dos años.

A M.C Nicolás A. Rodríguez, por todo el apoyo técnico brindado durante el desarrollo del proyecto, por siempre estar atento a mis necesidades, por aconsejarme, darme apoyo moral y siempre escucharme. Por compartir sus conocimientos científicos, por cuestionarme y ayudarme a superarme, por ser tan tolerante y paciente, por la confianza y la amistad que se construyó durante este año. A M.C. Nina G. Heredia S., por compartir sus conocimientos y brindarme apoyo técnico en el desarrollo de la tesis, por sus consejos, por la confianza y amistad construida durante este tiempo y por toda la diversión y las experiencias compartidas. A Karla y Tere por apoyarme en el trabajo en diversas ocasiones, por todas las risas, consejos y en general por hacer mis estancia en el laboratorio más divertida.

Al Ing. Germán Cumplido B. por el apoyo técnico brindado, por facilitarme el uso de las instalaciones de los equipos de la planta piloto de carnes, a la M.C. Luz del Carmen Montoya por abrirme las puertas de su laboratorio y el M.C. Luis E. Robles O. por facilitarme el uso de equipo de laboratorio. A M.C. Ma. Isabel Grijalva Haro por apoyo en el desarrollo del proyecto y a Luis Enrique por el apoyo técnico brindado. A Q.B. Mónica A. Villegas O. y M.C. Jorge N. Mercado Ruíz, por el apoyo con el uso de equipo y préstamo de material.

A mis compañeros de generación, especialmente a Jonathan Díaz, Wendy Lizárraga, José I. Chavira, Cinthya Ruiz, Mayra Salmerón y Leonardo Fox. A mis amigos: Gabriela Milla, Thalía Bernal, David Encinas, Luisana Guirado, Daniel Wicochea, Christian Gómez, Mariela Paz, Ma. José Navarro, Glenda Alcántar, Lucy Puebla y Arturo Coronado, por su cariño y el apoyo incondicional, por escucharme y aconsejarme durante estos dos años, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por la confianza, por la diversión y todas las cosas que vivimos y compartimos durante el posgrado. A Gabriela González y Karen Almeraz por apoyarme durante mi primer año, por escucharme, por todas las risas, diversión y todos los buenos momentos que pasamos, por la confianza y la amistad que se construyó.

A mis maestros: Dra. Martha Nydia Ballesteros por compartir sus conocimientos, por siempre realizar su mayor esfuerzo en enseñar y brindarme su apoyo de asesoría para fines de la clase. Agradezco su incondicional apoyo moral, por siempre encontrar un espacio de su tiempo para escucharme y aconsejarme no sólo en cuestiones de conocimiento o de desarrollo del proyecto sino en cuestiones de vida, por abrirme las puertas y brindar confianza y amistad durante estos dos años. Al Dr. Humberto González y la Dra. Aída Peña por compartir sus conocimientos de estadística, por la asesoría personalizada brindada para fines de la clase y del desarrollo de proyecto de tesis. Y al Dr. J. Fernando Ayala por compartir sus conocimientos en la clase de taller, por comentarios y observaciones que siempre fueron constructivos y precisos, por toda la atención brindada durante los dos años y por su excelente actitud siempre tan positiva y alegre.

DEDICATORIA

A mi mamá por creer en mí y apoyarme.

A mi Tita por ser una inspiración y una mujer tan excepcional y extraordinaria.

CONTENIDO

	Página
Lista de Figuras	x
Lista de Tablas	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
2.1 Importancia de los Productos Multigrano	3
2.2 Funcionalidad y Digestibilidad de Polisacáridos en la Harina.	5
2.2.1 Almidón	6
2.2.2 Fibra Dietaria.	9
2.3 Caracterización y Funcionalidad de las Harinas	10
2.4 Cereales y Leguminosas Utilizadas en Panificación	12
2.4.1 Trigo	12
2.4.2 Maíz, Avena y Soya	13
2.4.3 Garbanzo	15
2.5 Funcionalidad de Harinas Multigrano	16
2.6 Procesamiento de Granos y su Efecto en la Funcionalidad de la Harina	18
2.7 Índice glucémico de los Alimentos	20
2.7.1 Implicaciones en la Salud	21
2.7.2 Estimación del Índice Glucémico	23
III. HIPÓTESIS	24
IV. OBJETIVO	25
4.1 Objetivo General	25
4.2 Objetivos Específicos	25
V. MATERIALES Y MÉTODOS	26
5.1 Materiales	26
5.2 Caracterización Físicoquímica.	26

CONTENIDO (continuación)

5.3 Condiciones de Procesamiento	27
5.4 Nixtamalización	29
5.5 Almidón Resistente	30
5.6 Formulación Multigrano	31
5.7 Estimación del Índice Glucémico <i>in vitro</i>	32
5.8 Análisis Estadístico	33
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
6.1 Caracterización de Granos	35
6.2 Condiciones de Procesamiento	38
6.3 Nixtamalización	53
6.4 Perfil Viscoamilográfico de Harinas Individuales	54
6.5 Almidón Resistente en Harinas Individuales.	62
6.6 Perfil Viscoamilográfico de Harinas Multigrano	65
6.7 Panificación de Formulaciones Multigrano	68
6.8 Almidón Resistente en los Panes Multigrano	73
6.9 Estimación del Índice Glucémico <i>in vitro</i>	75
VII. CONCLUSIÓN	78
VIII. RECOMENDACIONES	79
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Humedad del grano de maíz nixtamalizado a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo	39
2	Humedad del grano de garbanzo nixtamalizado a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo	40
3	Dureza del grano de maíz a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo	42
4	Dureza del grano de garbanzo a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo	43
5	Curvas de secado convectivo de maíz, trigo y garbanzo	44
6	Cohesividad y adhesividad de las masas de maíz y garbanzo a distintos tiempos de cocción	46
7	Perfil viscoamilográfico de harinas de maíz y garbanzo nixtamalizado a diferentes tiempos de cocción	48
8	Humedad del grano al inicio y final del secado convectivo	54
9	Perfil viscoamilográfico de las harinas de maíz y garbanzo	57
10	Perfil viscoamilográfico de harinas de trigo y harina de avena	60
11	Perfil viscoamilográfico de formulaciones multigrano naturales y con tratamiento	67
12	Panes de formulaciones multigrano	71
13	Hidrolisis enzimática de panes multigrano	77

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Composición química de harina de trigo blanca y multigrano	5
2	Efectos de la cocción sobre los carbohidratos de garbanzo	10
3	Formulaciones multigrano	32
4	Peso hectolítrico y peso de mil granos de los distintos granos	35
5	Composición proximal de los granos	37
6	Humedad de harinas nixtamalizadas a distintos tiempos de cocción	45
7	Distribución de tamaño de partículas de las harinas nixtamalizadas	52
8	Humedad de harinas individuales	55
9	Almidón resistente de harinas individuales	63
10	Volumen específico de panes multigrano	69
11	Composición proximal de panes multigrano	72
12	Almidón resistente de pan multigrano	74
13	Índice de hidrólisis y estimación de índice glucémico de panes multigrano	76

RESUMEN

Tradicionalmente los productos de panadería son de alto índice glucémico (IG) y se han visto asociados al problema de obesidad y consecuencias como diabetes tipo 2. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la nixtamalización con choque térmico de los granos en la funcionalidad de una harina multigrano, para la elaboración de pan de moderado IG. Se establecieron las condiciones óptimas de cocimiento de granos. Posteriormente los granos fueron nixtamalizados de forma tradicional y con choque térmico a ~30 °C y a ~1 °C, se obtuvieron las harinas y se evaluaron tres formulaciones multigrano, de las cuales se seleccionó una para finalmente elaborar pan multigrano y evaluar la composición proximal, el contenido de almidón resistente (RS) e IG *in vitro*. Los resultados mostraron diferencias significativas en los perfiles viscoamilográficos de los distintos tratamientos conforme aumentó la intensidad del proceso. Así mismo, el maíz con choque térmico a ~30 °C y el garbanzo con choque térmico a ~1 °C resultaron en mayor RS. Comparado con el pan blanco, se encontró un aumento en el contenido de proteína, grasa y ceniza en los panes multigrano. El contenido de RS en el pan multigrano aumentó con el uso de harinas nixtamalizadas comparado con el pan multigrano con harinas sin nixtamalizar. Se logró reducir el IG en un 15.6% en los panes multigrano sin comprometer demasiado la calidad del pan. Se concluye que la nixtamalización con choque térmico tanto a ~30 °C como a ~1 °C, aumenta el contenido del RS pero no mejora la funcionalidad de las harinas. Finalmente el aumento del RS en el pan multigrano no causó efecto significativo en la reducción del IG con respecto al pan con harinas sin nixtamalizar, sin embargo representa una mejor opción que el pan blanco. Es necesaria más investigación para lograr reducir más el IG del pan sin comprometer sus características sensoriales.

Palabras clave: Pan multigrano, índice glucémico y almidón resistente.

ABSTRACT

Traditionally baked goods have high glycemic index (GI) and have been associated with the problem of obesity and consequences like type II diabetes. The objective of this work was to evaluate the effect of nixtamalization with heat shock of grains in the functionality of a multigrain flour for the elaboration of bread of moderate GI. The optimal cooking conditions were established for the grains. Afterwards grains were nixtamalized traditionally or with heat shock at a ~ 30 °C y ~ 1 °C, flours were then obtained and three multigrain formulations were evaluated, from which one was selected to finally elaborate a multigrain bread and evaluate chemical composition, resistant starch (RS) content and GI *in vitro*. The results showed significant differences in the pasting profile of the different treatments as the intensity of the process increased. Likewise, maize with heat shock at ~ 30 °C and chickpea with heat shock at ~ 1 °C showed increased RS. Compared to white bread, multigrain bread shows increased content of protein, fat, and ash. An increase in RS was found in multigrain bread with the use of nixtamalized flours. GI was reduced 15.6% in multigrain bread without compromising in great extent the bread quality. Finally, the increase of RS in the multigrain bread did not cause a significant effect on the reduction of GI when compared with multigrain bread made with non nixtamalized flours, nevertheless it represents a better option than white bread. More research is necessary to achieve a lower GI in bread without compromising its sensory characteristics.

Key words: Multigrain bread, glycemic index and resistant starch.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha cambiado el estilo de vida a uno más práctico y acelerado (Yach, 2005). Esto ha llevado al consumo de alimentos rápidos densos en energía, entre los que se encuentran algunos productos de panificación (WHO/FAO, 2003). La inclusión de este tipo de alimentos en la dieta y la falta de actividad física (entre otros factores), han conducido a un aumento desmesurado de la obesidad y sobrepeso a nivel mundial (WHO, 2014). De acuerdo con la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, ENSANUT (2012) en México, la prevalencia de obesidad y sobrepeso es de 73% para mujeres y 69.4% para hombres.

Entre los efectos adversos en la salud del sobrepeso y la obesidad están bien documentados, arteriosclerosis, diabetes, infartos, cáncer, hipertensión y otras enfermedades cardiovasculares (Bertsias *et al.*, 2003; Clavijo, 2009). Es por esto que en los últimos años el consumidor opta cada vez más por alimentos que resguarden su salud. También la industria alimentaria se ha esforzado en desarrollar productos que cubran esta necesidad (Mataix-Verdú *et al.*, 2005). Una de las alternativas para satisfacer la demanda de productos saludables, es la incorporación de fibra en los alimentos.

El desarrollo de panes integrales y más recientemente multigrano, representa una buena opción para ofrecer productos saludables al consumidor, debido al alto contenido de fibra y mayor contenido de proteína (Lunn *et al.*, 2007). Sin embargo, las características de calidad del pan (e.g. firmeza, esponjosidad, miga) se ven comprometidas al añadir harina o fibra de fuentes distintas al trigo (Indrani *et al.*,

2010), por lo que se han desarrollado alternativas. Una de estas alternativas, es el uso de aditivos como las gomas, carboximetilcelulosa, gluten, entre otros (Indrani *et al.*, 2011). Sin embargo, cambios en el procesamiento del grano podrían representar una opción para mejorar estos productos sin la necesidad de utilizar aditivos. No obstante esta área no han sido ampliamente explotada y mucho menos en un sistema multigrano, por lo que surge el interés de estudiar los efectos del procesamiento de los granos y su harina en la calidad del pan, sin olvidar la necesidad del consumidor por alimentos más nutritivos.

II. ANTECEDENTES

2.1 Importancia del Pan Multigrano

El término productos de panadería o productos horneados, se aplica a una gama amplia de productos que incluye a los panes, pasteles, masas o bollería, galletas y muchos otros productos. Se pueden definir como alimentos fabricados principalmente de harina de trigo o harinas de otros cereales, mezcladas con otros ingredientes y que son transformados en masa, moldeados y horneados (Cauvain *et al.*, 2008). La fabricación del pan es uno de los descubrimientos más importantes de la humanidad, comparable posiblemente con el descubrimiento del fuego y la invención de la rueda. El pan ha representado un papel esencial en el desarrollo de la humanidad y constituye una de nuestras principales fuentes de alimentación (Dobraszczyk *et al.*, 2001).

Durante mucho tiempo el aumento del consumo de pan en el mundo ha sido prácticamente paralelo al crecimiento de la población mundial. Sin embargo, desde la década de los años sesenta, se ha observado un descenso notable y progresivo en el consumo de pan en el mundo. Se piensa que la causa se debe a la pérdida de prestigio del pan, al ser considerado un alimento barato y por otro lado la creencia de que es un alimento que “engorda” o incluso pensar que el pan no tiene valor nutricional (Serra-Majem *et al.*, 2010).

Los productos de panificación son tradicionalmente elaborados a partir de harina de trigo refinada, la cual excluye dos partes anatómicas del grano: el germen y el salvado (Brown, 2011). Por tanto la harina está constituida sólo por el endospermo, el cual está

compuesto principalmente por almidón. El salvado y el germen son ricos en fibra soluble e insoluble, almidones resistentes y oligosacáridos, además de contener más lípidos, proteína, vitaminas y minerales que el endospermo (Angioloni *et al.*, 2011). En general, todos los granos tienden a ser más ricos en fibra en el salvado que en el endospermo (Charley, 2012). Por lo que la molienda del grano entero, siempre brindará una harina de mejor calidad nutricional, sin importar la fuente (cereal o leguminosa) que se utilice (Townsend, 2001).

Se recomienda consumir al menos tres porciones al día de grano entero o bien que la mitad de los alimentos de granos consumidos sean de grano entero, pero se estima que por lo menos en EUA el consumo de la recomendación no llega a la mitad (Whole-Grain-Council, 2011). En México la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 recomienda la ingestión de 30 g de fibra dietaria al día en adultos. Aunque muchos consumidores desconocen los beneficios de los granos enteros o bien la recomendación, existe una creciente tendencia hacia el consumo de productos integrales (Slavin, 2003). Por lo tanto, el uso de harinas integrales y multigrano en el desarrollo de productos de panificación, ha tomado fuerza en los últimos años, además de que proporciona un sabor único al producto, el cual es cada vez más aceptado por el consumidor (Townsend, 2001).

Con base en estos antecedentes y en vista de las características funcionales y nutricionales propias de los diferentes granos, surge el interés en realizar mezclas de granos. Las harinas multigrano o compuestas se pueden considerar como mezclas de harinas de dos o más tipos de granos. Así, en la elaboración de productos horneados y de pastas alimenticias se han utilizado harina de trigo y harinas procedentes de otros granos. También se han utilizado harinas multigrano para la elaboración de distintos productos (Dendy, 2001). Los panes multigrano son aquellos elaborados con múltiples granos (cereales, leguminosas o semillas) y son más nutritivos y ricos en sabor que el pan blanco o convencional (Indrani *et al.*, 2010).

La Tabla 1 muestra la composición química de una harina blanca y una harina multigrano. Se puede observar que la harina multigrano es más rica en fibra y en proteína. Por esto, la utilización de mezclas de granos de diferentes fuentes (e.g cereales, tubérculos, leguminosas, frutas, entre otras.) podría representar beneficios a la salud (Indrani *et al.*, 2011). Es por esta razón que la industria de la panificación ha realizado esfuerzos por elaborar productos multigrano, los cuales se ha visto que tienen buen sabor y aroma (Indrani *et al.*, 2010). Sin embargo, la utilización de granos enteros presenta algunas desventajas tales como menor suavidad, textura y humedad del producto final, además de elevar el precio del producto (Angioloni *et al.*, 2012a; Slavin, 2003). Es por esto que la utilización de harinas multigrano, representa un reto tecnológico para obtener productos horneados de buena calidad y costos aceptables.

Tabla 1. Composición química de harina de trigo blanca y multigrano		
Componente (%)	Harina de trigo blanca	Harina multigrano*
Ceniza	0.52	3.57
Proteína	11.3	26.6
Lípidos	1.2	3.3
Fibra dietaria	3.8	25.3

* Soya, semilla de fenogreco, linaza y semilla de ajonjolí. Fuente: Indrani *et al.* (2010).

2.2 Funcionalidad y Digestibilidad de Polisacáridos en la Harina

Los productos elaborados con harinas blancas proporcionan un alto contenido de carbohidratos (almidón) que son rápidamente absorbidos (Pereira *et al.*, 2002). Lo anterior, se ha visto que eleva rápidamente la concentración de glucosa en sangre y a su vez esto se ha asociado con el desarrollo de obesidad, sobrepeso y diabetes (Kristo *et al.*, 2013). Por el contrario, los productos altos en fibra, tienen una menor respuesta en el incremento de glucosa en sangre (Hirsch *et al.*, 2010). La respuesta glucémica es dependiente del grado de hidrólisis de los carbohidratos presentes en el alimento

(digestibilidad). Ésta a su vez se ve afectada por la disponibilidad de los carbohidratos a las enzimas digestivas, por lo que existen diversos factores que modifican esta disponibilidad y por tanto la digestibilidad y finalmente la respuesta glucémica en sangre (Brites *et al.*, 2011).

2.2.1 Almidón

El almidón es el componente principal de las harinas y es importante para la elaboración de los productos de panadería. El almidón está compuesto esencialmente de glucosa en forma de dos componentes: amilosa y amilopectina. La amilosa es un polímero lineal de unidades de α -D-glucosa unidas por enlaces α -1,4 (Charley, 2012). La amilopectina es un polímero ramificado compuesto por cadenas de α -D-glucosa unidas por enlaces α -1,4, a las que a su vez se le unen otras cadenas iguales por enlaces α -1,6, lo que la hace altamente ramificada y de alto peso molecular. La proporción de amilosa y amilopectina varía dependiendo de la variedad y especie del cereal, pero en general la amilosa se encuentra en 23 ± 3 % (Hoseney, 1998).

De acuerdo con Hoseney (1998), todos los productos horneados llegan a un punto en el que al aumentar la temperatura y la presión generada por el gas (CO_2), la masa no puede expandirse más. Los cambios que sufre el almidón en este sistema son responsables, por lo menos parcialmente, del alcance de este punto. En general, el almidón juega un papel importante en la textura final de los productos horneados (Koehler *et al.*, 2013), por lo que es relevante entender el comportamiento del almidón bajo condiciones de calor y humedad.

Cuando el almidón se calienta en agua, se produce una solución viscosa que dará lugar a un gel o pasta y a este proceso se le denomina gelatinización y es irreversible cuando se calienta por arriba de la temperatura de gelatinización. Conforme el almidón se calienta en agua, los gránulos de almidón van absorbiendo más agua, lo que aumenta

la viscosidad, provocando que la red de almidón se expanda distorsionando los gránulos y se libere amilosa en la solución (Charley, 2012; Hosenev, 1998). La mayoría de los almidones nativos gelatinizan a una temperatura no mayor a 85 °C, sin embargo varía dependiendo de la fuente del almidón, e.g. los provenientes de tubérculo gelatinizan a temperaturas inferiores.

Las moléculas de amilosa que se han lixiviado de los gránulos hinchados se dispersan en el líquido de la pasta formada mientras ésta se mantenga caliente. La pasta caliente retiene su capacidad para fluir, es decir, es viscosa y no rígida (Charley, 2012). Cuando la pasta se enfría la entalpía disminuye lo que provoca que la fuerte tendencia de las moléculas de amilosa por asociarse ya no sea contrarrestada. Las moléculas de amilosa se reasocian entre sí por enlaces de hidrógeno y dan lugar a un gel firme (Hosenev, 1998). Este proceso se denomina retrogradación. La amilopectina también se retrograda pero tarda horas o días, por lo que la amilosa es la responsable por la dureza inicial de un pan, mientras que la amilopectina, por la dureza relacionada con el envejecimiento (Koehler *et al.*, 2013).

Debido a lo anterior, la retrogradación del almidón influye en gran medida en la textura del pan y en la conservación de la calidad del pan durante el almacenamiento (Eliasson *et al.*, 2001). De acuerdo con el mismo autor, la retrogradación además de depender de la relación amilosa:amilopectina, se ve afectada por el contenido de lípidos, α -amilasas e hidrocoloides que tienden a disminuirla, por lo que éstos son usados para retardar el envejecimiento del pan. En general, en función del contenido de amilosa, la masa será más o menos pegajosa, tendrá mayor o menor firmeza y viscosidad.

Por otro lado, la facilidad con la que los carbohidratos de los alimentos se digieren y se absorben es de gran interés para la salud humana ya que se encuentran asociados con efectos en la salud (Jenkins *et al.*, 2002). La digestión de los carbohidratos comienza en la boca con la acción de la α -amilasa salival, la cual los degrada a oligosacáridos.

Después, en el intestino delgado actúa la α -amilasa pancreática, la cual termina de hidrolizar las moléculas para obtener finalmente glucosa y disacáridos, que serán hidrolizados a glucosa por otras enzimas. La glucosa se absorbe por los enterocitos y se transporta al torrente sanguíneo provocando la liberación de insulina (Lunn *et al.*, 2007).

Englyst *et al.* (1996), clasificaron al almidón de acuerdo con su digestibilidad en tres categorías: almidón rápidamente digestible (RDS), almidón lentamente digestible (SDS) y almidón resistente (RS). El primero se refiere al almidón que es rápidamente absorbido en el intestino delgado y eleva los niveles de glucosa en sangre después de su ingestión, la degradación del almidón a glucosa se da en 20 minutos aproximadamente (Englyst *et al.*, 2007). El SDS se refiere al almidón que es hidrolizado (por α -amilasas) y absorbido en el intestino delgado pero posee una baja respuesta postprandial de glucosa en sangre, ya que la glucosa se hace notar en aproximadamente 100 minutos de haber iniciado la digestión (Jenkins *et al.*, 1981).

El almidón resistente es aquel que resiste la hidrólisis de α -amilasas en el intestino delgado y es fermentado por la microflora del colon. Existen cuatro tipos de almidón resistente: El tipo 1, se refiere al almidón físicamente inaccesible atrapado en la matriz del alimento; tipo 2, son las regiones cristalinas del almidón nativo y amilopectina retrogradada; tipo 3 es la amilosa retrogradada; y tipo 4 es el resultado de la modificación química (Hoover *et al.*, 2003; Wasserman *et al.*, 2007).

La digestibilidad del almidón se puede ver afectada por diversas situaciones como lo es el procesamiento del almidón, la interacción con lípidos, la relación amilosa:amilopectina, grado de cristalinidad, distribución de gránulos B, grado de asociación entre moléculas de almidón, distribución física del almidón en relación a la fibra dietaria, inhibidores de α -amilasa y las condiciones de almacenamiento del producto (Hoover *et al.*, 2003).

2.2.2 Fibra Dietaria

La Asociación Americana de Químicos en Cereales (AACC, 2013) define a la fibra dietaria como “la parte comestible de los alimentos de procedencia vegetal o de hidratos de carbono análogos que son resistentes a la digestión y o absorción en el intestino delgado humano, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La fibra dietaria incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas”. La fibra dietaria se puede clasificar de acuerdo a su solubilidad en soluble e insoluble. La fibra soluble incluye a β -glucanos, pentosanos, pectina, arabinoxilanos y oligosacáridos. Por otra parte, la fibra insoluble incluye a la celulosa, hemicelulosa, lignina y almidones resistentes (Chawia *et al.*, 2010). La capacidad de la fibra dietaria de reducir la respuesta glucémica, se debe principalmente a que la fibra forma una barrera física para la α -amilasa por lo que hay menor digestibilidad de carbohidratos. En general los beneficios a la salud de la fibra dietaria incluye la mejora de la salud gastrointestinal, control de diabetes tipo 2, reducción del riesgo a padecer enfermedades cardiovasculares e hipertensión, cáncer, entre otras (Jenkins *et al.*, 1998; Lunn *et al.*, 2007).

En cuanto a la funcionalidad de la fibra en el pan, en general la fibra dietaria provoca efectos negativos en la calidad del pan, ya que disminuye su textura, aumenta su firmeza, disminuye el volumen y en altas concentraciones imparte un sabor desagradable (Ktenioudaki *et al.*, 2012; Trough *et al.*, 2004). Sin embargo, los arabinoxilanos y β -glucanos se han asociado con una mayor capacidad de absorción de agua y forman soluciones viscosas, lo que podría incrementar la capacidad de retención de gas en la masa (Koehler *et al.*, 2013).

Ahora bien, el procesamiento que se le dé al alimento que contiene la fibra modifica las concentraciones y la digestibilidad de los diferentes tipos de fibra tal como se muestra en la Tabla 2 extraída del estudio realizado por Ros-Berruendo *et al.* (2010). Zhang *et al.*

(2011) encontraron que la extrusión de salvado de avena mejoró las propiedades reológicas de la fibra soluble. Güzel *et al.* (2012) encontraron que la cocción de garbanzo a alta presión resulta en mayores niveles de RS y menores de almidón rápidamente digestible.

Desde el punto de vista nutricional la retrogradación de la amilosa es importante, ya que esta es una forma de almidón resistente. Las condiciones que provocan la retrogradación de la amilosa son favorables para la formación de RS, por lo que para producir alta cantidad de almidón no digestible es recomendable usar almidones altos en amilosa y condiciones de procesamiento que involucren periodos de calentamiento-enfriamiento, e.g. extrusión, autoclave, choque térmico y templado (Eliasson *et al.*, 2001).

Tabla 2. Efectos de la cocción sobre los carbohidratos de garbanzo			
Parámetro	Garbanzo crudo	Garbanzo con cocción doméstica	Garbanzo con cocción industrial
Fibra dietaria total	9.6	11.1	10.1
Fibra dietética soluble	2	4	4
Fibra dietética insoluble	7.6	7.1	6.1
Almidón total	47.4	27.8	29.2
Amilosa	17.4	20.4	21.4
Almidón digerido rápidamente	2.2	2.6	2.7
Almidón digerido lentamente	5.4	14.6	22.8
Almidón resistente	39.9	10.6	3.8
Digestibilidad del almidón	4.6	9.5	9.1

Fuente: Ros-Berruendo *et al.* (2010)

2.3 Caracterización Y Funcionalidad de las Harinas

El primer acercamiento a la evaluación de la funcionalidad se da en el grano. Las propiedades y características del grano juegan un papel muy importante, ya que están

vinculadas con el rendimiento y calidad de producto terminado. Los parámetros más relevantes en la evaluación del grano son la humedad, el peso hectolítrico (densidad aparente), el peso de mil granos, proteína, lípidos y ceniza. Todos estos parámetros se deben evaluar antes de realizar la molienda del grano, ya que son determinantes para la calidad de la harina (Serna-Saldívar, 1996).

Las pruebas más importantes para determinar la funcionalidad de una harina son las pruebas de reología, ya que están directamente relacionadas con los parámetros de procesamiento y calidad de los productos terminados (Serna-Saldívar, 1996). A la masa se le aplica una deformación y la medida de las fuerzas resultantes dan una medida de la rigidez o viscosidad del material, para lo que se han desarrollado diversos aparatos (Dobraszczyk *et al.*, 2001). El farinógrafo y mixógrafo proporcionan parámetros importantes para el proceso de producción de pan, como la absorción de agua, tiempo óptimo de amasado, estabilidad de la masa, entre otros. El extensógrafo mide la resistencia y extensibilidad de la masa formada óptimamente, mientras que el alveógrafo mide la extensión y tenacidad (Dobraszczyk *et al.*, 2001; Serna-Saldívar, 1996). Finalmente, el viscoamilógrafo mide las características de gelatinización y retrogradación del almidón registrando las variaciones de viscosidad a diferentes tiempos y temperaturas.

La prueba que dictará finalmente la funcionalidad de una harina para panificación, es la propia elaboración del pan y la evaluación de su calidad. Los parámetros para evaluar la calidad del pan son el volumen específico, la textura, el color, la evaluación de la miga, evaluación sensorial, entre otras (Serna-Saldívar, 1996). En general, la funcionalidad de una harina está determinada no por uno sino por diversos parámetros. Así, las propiedades funcionales de una harina determinarán su uso final, es decir, si la harina puede ser utilizada para elaborar pan fermentado, pasteles, galletas o tortillas, ya que cada producto requiere de harina de características diferentes para obtener un producto de calidad.

2.4 Cereales y Leguminosas Utilizadas en Panificación

De acuerdo con Charley (2012) los granos de cereales han constituido la principal fuente de energía para la especie humana y son una gran fuente de proteína, dado que los cereales proporcionan casi la mitad (47%) de las proteínas de la dieta en el mundo. Sin embargo, éstos son especialmente deficientes en el aminoácido esencial lisina. Por otro lado, las leguminosas aportan 20% de la proteína consumida en todo el mundo y son altas en lisina, pero deficientes en aminoácidos azufrados. Por lo que se ha recomendado la combinación de leguminosas y cereales para complementar los aminoácidos y consumir proteína de mejor calidad (González-Torres *et al.*, 2007).

Aunado a lo anterior, en el rubro de la panificación se han realizado esfuerzos para elaborar productos de panificación a base de harinas diferentes al trigo, e.g. otros cereales, leguminosas, tubérculos y algunas frutas, así como combinaciones de éstas. Esto con la finalidad de proporcionar productos de mejor calidad nutricional y en algunos casos representan una alternativa para personas con enfermedad celiaca (intolerantes al gluten) (Indrani *et al.*, 2010; Miñarro *et al.*, 2012). Sin embargo, la calidad del producto final podría verse afectada, por lo que es importante estudiar los cambios que ocurren en el procesamiento de los granos con los que se pretende trabajar y evaluar cómo se afecta la funcionalidad de sus harinas (Angioloni *et al.*, 2012a).

2.4.1 Trigo

El trigo es el cereal más utilizado en la industria panadera y se clasifica en dos grandes grupos: el trigo común (*Triticum aestivum*) utilizado para panadería y el trigo duro (*Triticum durum*) que se utiliza para pastas. A su vez, el trigo común se puede clasificar en suave o duro (Brown, 2011). Del trigo duro se obtiene harina con altos niveles de

gránulos de almidón dañados, con mayor capacidad de absorción de agua y mayor contenido de proteína, lo cual es deseable para la producción de pan. El trigo suave proporciona harinas de partículas relativamente pequeñas de forma irregular que no fluyen fácilmente y con poco contenido de almidón dañado y proteína por lo que éstas son generalmente usadas para bizcochos y galletas (Dobraszczyk, 2001).

La propiedad única de la harina de trigo para formar pan se debe principalmente al contenido y calidad de la proteína. El contenido de proteína de una harina para la elaboración de pan fermentado debe ser mayor del 10%. El gluten es el conjunto de proteínas que en mayor medida le confiere a la harina de trigo las características funcionales para hacer pan (Khatkar, 2009), ya que al combinarse con agua se forma una masa viscoelástica y cohesiva con capacidad de retener el gas que se genera durante la fermentación y el horneado, lo que finalmente resulta en un pan de características físicas y sensoriales de calidad (Hoseney, 1998).

Las proteínas del gluten se encuentran en la matriz proteica que embebe al almidón en el endospermo del grano y estas son gluteninas (39%), gliadinas (43%) y otras proteínas (4.4%). Sin embargo, a pesar de que se maneja como una proteína, en realidad está compuesto por múltiples proteínas y otros componentes como humedad, almidón, lípidos y fibra. La fracción de glutenina es la que le confiere a la masa sus propiedades elásticas, mientras que las gliadinas son fluidas y pegajosas. Un balance adecuado de elementos elásticos y viscosos es esencial para obtener una masa adecuada para un pan de calidad (Charley, 2012; Kent, 1984).

2.4.2 Maíz, Avena y Soya

Edema *et al.* (2005) evaluaron las propiedades funcionales y nutricionales de un pan de maíz elaborado con diferentes harinas de maíz y la mezcla de harina de maíz con soya en proporción 9:1 y 8:2. Encontraron que la proporción 9:1 tuvo una miga regular, poca

formación de grietas, la mejor aceptación en sabor, textura y en general mejor aceptabilidad. Los panes elaborados con soya (10 y 20%) obtuvieron los valores más altos de volumen (116.93 y 116.53 mL) y se duplicó la cantidad de proteína y de ceniza comparado con las otras harinas de maíz. Esto sugiere que la incorporación de la soya podría mejorar la calidad nutricional y funcional del pan.

El endospermo de la avena (*Avena sativa*) contiene más proteína y aceite que cualquier otro cereal, la riqueza de lípidos es de 2 a 5 veces mayor a la de trigo, pero el contenido proteico es muy similar aunque no contiene gluten. El contenido de amilosa es relativamente menor comparado con el de otros cereales como la cebada o el maíz (Welch *et al.*, 2001). La fibra soluble de la avena está compuesta principalmente por β -glucanos, los cuales tienen efectos en la funcionalidad de harinas y además propiedades benéficas a la salud (García-Villanova *et al.*, 2010; Reyna-Villasmil *et al.*, 2007).

Salehifar *et al.* (2007), evaluaron el efecto de la sustitución de harina de trigo con harina de avena en 10, 20, 30 y 40% en la funcionalidad de la harina. Los resultados mostraron que la adición de harina de avena retardó el endurecimiento del pan e incrementó la capacidad de retención y absorción de agua en todos los niveles de sustitución. Esto se le atribuye a los β -glucanos y en general a la fibra. Conforme aumentó el nivel de sustitución de avena, se encontraron niveles menores de resistencia (311-148 y 375 UE) y de extensibilidad (81-78 y 86 UE) para las harinas de avena y la de trigo, respectivamente. Adicionalmente, los panes elaborados con las harinas con 10 y 20 % de avena obtuvieron la mejor aceptación sensorial.

2.4.3 Garbanzo

México es un importante productor de garbanzo a nivel mundial y es la segunda leguminosa más importante en nuestro país después del frijol (Morales-Gómez *et al.*, 2004). El garbanzo contiene 10.7 % de fibra dietaria, de la cual la insoluble se encuentra en mayor proporción. La proteína comprende alrededor del 23 % pero al igual que en la soya, es deficiente en aminoácidos azufrados (Knights, 2004; Ros-Berruendo *et al.*, 2010). Sin embargo, contiene buena cantidad de lisina, por lo que puede considerarse como complemento adecuado de la harina de trigo (Pittaway *et al.*, 2008).

Gómez *et al.* (2008), evaluaron la funcionalidad de diferentes harinas de garbanzo y la sustitución total y parcial (50 %) de la harina de trigo para la elaboración de dos tipos de pasteles. Los resultados muestran que el volumen disminuyó conforme se aumentó la concentración de harina de garbanzo (397.50, 373.90 y 348.75 cm³ para pan 100 % de trigo, con 50 % de sustitución y 100 % garbanzo, respectivamente). En cuanto a las propiedades viscoamilográficas, las harinas de garbanzo presentaron valores menores en la viscosidad pico con respecto al trigo (877-1032 y 2621 cP, respectivamente) y menor viscosidad final. En cuanto a la textura (firmeza) se observó que al incrementar la proporción de harina de garbanzo el valor de firmeza aumentó 4.67, 7.12 y 4.38 N para la sustitución al 50 % y al 100 % y el pan control.

En general, diversos estudios sustentan que la utilización de harina de garbanzo en panadería resulta mejor que la de otras leguminosas, incluso en panes libres de gluten (Miñarro *et al.*, 2012). Además, la incorporación de leguminosas resulta en una mejor calidad nutricional de los panes ya que mejora la calidad de las proteínas, reduce los almidones rápidamente digestibles y aumenta la de almidones resistentes (Gularte *et al.*, 2012). Por tanto, resulta interesante el estudio de la harina del garbanzo como alternativa para panes de mejor calidad nutricional y de menor índice glucémico.

2.5 Funcionalidad de Harinas Multigrano

Indrani *et al.* (2011) evaluaron la incorporación de 0, 10, 20, 30 y 40 % de una harina multigrano (garbanzo descascarillado, centeno, soya y fenogreco) a harina de trigo integral para elaborar pan tipo “parotta” de la India. Los resultados mostraron que conforme se incrementó la incorporación de la harina multigrano, se redujo la resistencia a la extensión de 350 a 325-290 UB y extensibilidad de 140 a 130-101 mm, lo cual indica una disminución de la fuerza y extensibilidad de la masa. De igual forma, en el farinógrafo, la absorción de agua disminuyó de 75 a 74.6 %, el tiempo de desarrollo de la masa aumentó de 5.5 a 6.5 min y la estabilidad disminuyó de 4.8 a 2.5 min para la harina 0 % y la harina sustituida al 40 %, respectivamente. Adicionalmente, la aceptabilidad sensorial disminuyó conforme la sustitución aumentó.

Indrani *et al.* (2010) evaluaron el efecto en las características reológicas y de horneado de la sustitución de harina de trigo con 5, 10, 15 y 20 % de una harina multigrano (soya, semilla de fenogreco, linaza y semilla de ajonjolí). Los resultados mostraron que de igual forma la capacidad de absorción de agua aumentó de 58.4 a 66 %, el tiempo de desarrollo de la masa de 4.8 a 7.5 min y la estabilidad de la masa disminuyó de 6.2 a 5 min. Estos resultados indican que la adición de harina multigrano causó una hidratación tardía y desarrollo de gluten en la masa debido por el aumento de proteína, fibra dietaria, lípidos y minerales, lo cual a su vez condujo a un efecto adverso en la masa.

En el mismo estudio, el extensógrafo mostró que conforme se incrementó la cantidad de harina multigrano, todos los parámetros disminuyeron, la resistencia a la extensión de 560 a 455 UB, extensibilidad de 160 a 104 mm y área de 120 a 71 cm². Estos resultados indican que la adición de la harina multigrano interrumpe la continuidad de la matriz proteica del gluten, dando lugar a una menor elasticidad, extensibilidad y fuerza de la masa. En cuanto a las características amilográficas, la temperatura de gelatinización disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) de 66.5 a 60.8 °C, el pico de

viscosidad y la viscosidad de la pasta fría aumentaron de 821 a 1,074 y de 1102 a 1220 UA, respectivamente, lo que indica una fuerte tendencia de retrogradación por parte de las moléculas de almidón. Los valores de “setback” y de “breakdown” incrementaron de 544 a 615 UA y de 264 a 471 UA, respectivamente, lo que representa la resistencia de los gránulos de almidón al tratamiento térmico y al cizallamiento mecánico (Indrani *et al.*, 2010).

Por otro lado, la adición de harina multigrano disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) el volumen de pan de 560 a 445 mL y aumentó la firmeza de la miga de 520 a 660 g, mostrando un efecto adverso en la textura y calidad del pan. La forma de la corteza del pan mostró una tendencia a colapsar al 15 % de sustitución y se volvió plana a 20 % de sustitución. La evaluación de la miga mostró que los panes con 5 y 10 % de sustitución tuvieron granos fino-medianos y los panes con 15 y 20 % grueso-medianos. Con respecto a lo sensorial, los panes con 5 y 10% de harina multigrano no presentaron textura granulosa, el pan con 15 % presentó granulosis y el de 20 % fue inaceptable. Por todo lo anterior, los autores concluyeron que es posible obtener panes multigrano de calidad aceptable con una sustitución no mayor al 15 %.

Es evidente que la elaboración de pan multigrano representa un reto tecnológico para la industria. Además, debido a la diversidad de mezclas de granos que se pueden hacer y a la interacción de sus diversos componentes, el sistema de un pan multigrano es aún más complejo que el de un pan elaborado con una sola harina. Cabe mencionar que no existe gran variedad de estudios que evalúen la funcionalidad de estas harinas y su aplicación en diferentes productos de panadería por lo que existe un área de oportunidad en este rubro.

En el esfuerzo por mejorar la calidad de los productos altos en fibra, como los integrales y multigrano, se ha evaluado la incorporación de aditivos a las mezclas, los cuales han resultado en panes de mejor calidad. Indrani *et al.* (2011), incorporaron

gluten en polvo (2 %), sodio estearoil-2-lactilato (0.5 %) y hidroxipropilmetilcelulosa (0.5 %) a una harina con 30 % de sustitución con una mezcla multigrano (garbanzo descascarillado, centeno, soya y fenogreco). Los resultados mostraron que en cuanto a la resistencia a la extensión y a la extensibilidad, no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre la harina control (0 % de sustitución) y la harina multigrano con aditivos, por tanto, el uso de aditivos mejoró las propiedades de la harina ya que se encontró un comportamiento similar al del control. En el farinograma se observó un mayor tiempo de desarrollo y estabilidad de la masa (7 y 6.5 min) que todos los demás tratamientos. Los autores concluyen que en general, el uso de harina multigrano con aditivos mejoró las propiedades físicas, sensoriales y nutricionales del pan multigrano.

La tendencia al consumo de alimentos 100 % naturales va en aumento, por lo que la utilización de aditivos podría ser cuestionable. Además, el uso de aditivos puede elevar el costo del producto y los efectos en la salud no han sido completamente evaluados, por lo que es importante encontrar otras alternativas para mejorar la calidad de harinas integrales y multigrano. Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores que pueden modificar las características del almidón, dentro de estos factores las condiciones de procesamiento del grano podrían afectar significativamente las características funcionales de la harina. Por lo anterior, resulta de interés el estudio del efecto de distintos procesos en la funcionalidad de las harinas.

2.6 Procesamiento de Granos y su Efecto en la Funcionalidad de la Harina

Como ya se mencionó anteriormente, los granos varían en su composición química y también en su forma física, por lo que en su transformación en harina sus propiedades cambian. Se ha reportado que el procesamiento que se le da al grano modifica la composición química, por lo que propiedades esenciales para la elaboración de un pan, como la viscoelasticidad de la masa (elasticidad y extensibilidad) podrían verse afectadas (Dewettinck *et al.*, 2008; Kihlberg *et al.*, 2004).

La nixtamalización es un proceso muy antiguo aplicado a los granos de maíz para la producción de tortillas. El proceso de nixtamalización consiste en la cocción del grano entero en una solución de Ca(OH)_2 en concentración de 0.50 a 2 %, entre 83 y 100 °C por 50-60 min (Kent *et al.*, 1994). Después el maíz cocido se enfría, se deja reposar en la solución alcalina por 8-24 h y se obtiene nixtamal. El nixtamal es lavado con agua para eliminar la cal y finalmente se muele para obtener masa; si esta masa es deshidratada se obtiene la harina (Bressani, 1995; Cornejo-Villegas *et al.*, 2013).

Durante las distintas etapas del proceso de nixtamalización y debido a los múltiples factores que intervienen, puede ocurrir una gran variedad de reacciones físicas y químicas (Badui-Dergal, 1999). La alta temperatura durante la cocción del grano y el valor de pH (~ 12), facilita diversas transformaciones en los componentes del grano (proteína, lípidos y su componente principal, el almidón). Entre éstas, se encuentran la degradación del pericarpio, la pérdida de proteína soluble y la gelatinización parcial del almidón (Méndez-Montealvo *et al.*, 2008).

Después de la nixtamalización, el tamaño de los gránulos de almidón aumenta, debido a que los gránulos se hinchan por la absorción de agua durante el proceso. El maíz nixtamalizado muestra menor viscosidad, lo cual se debe a que durante la nixtamalización algunos gránulos están en el endospermo periférico y se gelatinizan, disminuyendo su capacidad para producir pastas más compactas con mayor viscosidad (Méndez-Montealvo *et al.*, 2008). Más específicamente, la saturación de los sitios hidroxilo del almidón con los iones Ca^{+2} y OH^+ previene cualquier futura asociación entre las moléculas de almidón, resultando en una reducción de viscosidad de la pasta. Sin embargo, dentro del proceso de nixtamalización se ha observado que cuando se aumenta la concentración de cal, aumenta la viscosidad de “setback” (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004).

Las harinas nixtamalizadas muestran mayor temperatura de gelatinización que las harinas de maíz sin tratamiento alcalino. Esto puede estar asociado con las interacciones del almidón con lípidos, proteínas, calcio y proteína-calcio, las cuales podrán estabilizar la estructura del almidón (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009). La nixtamalización causa una menor reorganización de la estructura del almidón, por lo que hay una menor tendencia a la retrogradación. Por otra parte, la nixtamalización produce cambios que mejoran la calidad nutricional del maíz. Entre ellos se encuentra la mejora de la disponibilidad de lisina y triptófano, así como de la niacina, que normalmente se encuentra biológicamente indisponible. Se mejora el aprovechamiento de leucina e isoleucina, aumenta la cantidad de calcio y aumenta la digestibilidad del almidón. En general la nixtamalización mejora la calidad nutritiva del grano a pesar de la pérdida de proteína (Badui-Dergal, 1999). Sin embargo, el proceso de nixtamalización no ha sido evaluado en otros granos como el garbanzo o el trigo. Por lo que el efecto en las propiedades reológicas, fisicoquímicas y nutricionales de este proceso térmico alcalino en otros granos distintos al maíz es desconocido.

2.7 Índice Glucémico de los Alimentos

El índice glucémico (IG) se define como el área bajo la curva del incremento de la glucosa en sangre producida por una cantidad estándar de carbohidratos en un alimento, generalmente 50 g, comparado con el incremento producido por la misma cantidad de carbohidratos de una fuente estándar, generalmente glucosa o pan blanco, durante intervalos en un periodo de dos horas y se expresa como porcentaje (Willett *et al.*, 2002). Básicamente, el IG es una medida de la digestibilidad de carbohidratos. Los valores de IG clasifican a los alimentos en alto (≥ 70), intermedio (56-69) y bajo (≤ 55).

El IG puede ser influenciado por diferentes factores, como el tipo de azúcar (fructosa, glucosa, sacarosa, entre otros), el tipo de almidón (amilosa:amilopectina), la forma en

que el alimento fue procesado y la presencia de otros nutrientes como proteína, fibra y grasa (Lazarim *et al.*, 2009). Por ejemplo, la estructura abierta de la amilopectina hace que sea más fácil de digerir que la estructura lineal de la amilosa, por tanto los alimentos altos en amilosa resultan en una respuesta postprandial más baja y por tanto sacian por mucho más tiempo (más de seis horas) que los alimentos altos en amilopectina (Anderson *et al.*, 2003).

Aunado a lo anterior, la incorporación de almidones resistentes y diferentes tipos de fibra en los alimentos disminuyen el índice glucémico. Por lo que a las fuentes de estos componentes, como lo son los granos enteros, frutas y verduras, se les ha prestado atención en su utilización como buenas fuentes de fibra. En diversos estudios se ha observado que en alimentos de alto IG como el pan o la galleta, elaborados con harinas de granos enteros y/o leguminosas se ve disminuido el IG tanto en diabéticos como en personas sanas hasta en un 57% comparado con el pan blanco (Anderson *et al.*, 2004; Jenkins *et al.*, 2008).

2.7.1 Implicaciones en la Salud

Una dieta con alimentos de alto IG se ha asociado con el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, obesidad, diabetes tipo 2 y en algunos estudios con diferentes tipos de cáncer, además de resistencia a la insulina, concentraciones elevadas de triglicéridos y bajas de lipoproteínas de alta densidad (HDL) (Botero *et al.*, 2009; Ford *et al.*, 2001). Sin embargo, existe mucha inconsistencia en los diferentes estudios y falta estudiar más la asociación con las diferentes enfermedades. Por ejemplo, el cáncer es una enfermedad multifactorial y resulta complicado aseverar la relación entre el consumo de alimentos de alto IG y el riesgo de contraer cáncer (Silvera *et al.*, 2005). También en cuanto a la diabetes tipo 2, existen estudios que

asocian el consumo de alimentos de alto IG con el riesgo de contraer diabetes, pero hay otros que no han encontrado esta relación (Jenkins *et al.*, 2008).

Se dice que una dieta de alto IG promueve el exceso de peso, debido a que los alimentos de alto IG se absorben más rápido y además sacian el hambre por menor tiempo que los alimentos de bajo IG. Después de consumir una comida de alto IG, los niveles de glucosa en sangre y de insulina aumentan mucho más que con una comida de bajo IG. Altos niveles de insulina resultan en una simulación celular de absorción de nutrientes, inhibición de la producción de glucosa hepática y supresión de la lipólisis. Además, un subsecuente declive de glucosa en sangre inducido por la relativa hiperinsulinemia de una dieta de alto IG, puede resultar en hambre excesiva y por tanto una mayor ingestión de alimentos. Es por esto que se ha sugerido que una dieta de bajo IG es una alternativa dietaria para el tratamiento del sobrepeso y obesidad (Mirza *et al.*, 2011).

Por otro lado, se ha visto que una dieta de bajo IG ayuda a controlar la diabetes ya que reduce la secreción de insulina en pacientes con diabetes tipo 2 y en pacientes con diabetes tipo 1 reduce los requerimientos de insulina (Brand-Miller *et al.*, 2003). En un estudio por Ebbeling *et al.* (2007) se comparó una dieta de bajo IG con una dieta baja en grasa en adultos obesos y se encontró que los individuos que consumieron la dieta de bajo IG tuvieron mayor pérdida de peso y grasa corporal que los de la dieta baja en grasa, además de que se encontraron mejores concentraciones de HDL y triglicéridos. Sin embargo, la concentración de lipoproteínas de baja densidad fue mejor en la dieta baja en grasa.

2.7.2 Estimación del Índice Glucémico

El estudio de la respuesta postprandial de glucosa en sangre involucra el reclutamiento de varios individuos, lo que lo vuelve un método invasivo y costoso. Con base en esto surgió el interés por desarrollar metodologías *in vitro* que evaluaran el ritmo de hidrólisis de almidón, considerándolo como un predictor de los efectos fisiológicos de un alimento en particular. Goñi *et al.* (1997) desarrollaron un método sencillo donde se midió el ritmo de hidrólisis de los alimentos *in vitro* y los resultados se compararon con la medición de concentración de glucosa en sangre de individuos sanos que consumieron los mismos alimentos. Los resultados mostraron una correlación significativa ($r=0.89$) entre el método desarrollado por ellos y el método *in vivo* y propusieron la siguiente ecuación para estimar el índice glucémico: $IG= 39.7 + 0.55HI$ (HI= índice de hidrólisis). Por tanto la estimación del IG por el método *in vitro* proporciona información confiable y es un buen predictor del efecto fisiológico.

III. HIPÓTESIS

La nixtamalización con choque térmico de los granos de una harina multigrano, mejora la funcionalidad de la harina y permite la elaboración de pan con índice glucémico moderado.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la nixtamalización con choque térmico de garbanzo, trigo y maíz en la funcionalidad de una harina multigrano para la elaboración de pan de moderado índice glucémico.

4.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar los granos física y químicamente.
2. Establecer condiciones de procesamiento y obtener las harinas.
3. Evaluar las características funcionales de las harinas multigrano.
4. Evaluar la calidad y estimar el índice glucémico de los panes elaborados con las harinas multigrano.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

Se utilizó trigo panadero (*Triticum aestivum*) var. Villa Juárez fenotipo 2009 proporcionado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Cd. Obregón, Sonora; garbanzo (*Cicer arietinum*) var. Blanco Sinaloa de calibre 4X obtenido en ALIASSA, Hermosillo, Sonora y maíz (*Zea mays*) tipo blanco dentado cultivado en Sinaloa, México, disponible comercialmente. Se utilizó hojuela de avena comercial marca Quaker® y aislado de soya comercial marca ADM (Protein Specialties División, Decatur, IL, E.U.A.) Todos los materiales se almacenaron en cámara de refrigeración a 9 °C hasta su posterior uso. Además, se usó cal comercial (Calhidra, Hermosillo, Sonora, México).

5.2 Caracterización Fisicoquímica

Se evaluaron visualmente los granos enteros, para descartar posible infección. Se limpiaron los granos descartando grano quebrado, grano chupado, grano en mal estado, paja y otras impurezas. Para trigo, maíz, hojuela de avena y garbanzo se determinó el peso hectolítrico de acuerdo con el método 55-10.01 (AACC, 2000) y el peso de mil granos al trigo, maíz y garbanzo de acuerdo a Serna-Saldívar (2003). Ambos análisis se realizaron por cuadruplicado.

Se realizó análisis proximal a los granos enteros, a las harinas multigrano y a los panes multigrano. El grano entero se molió en un molino de café marca Krups[®] (Modelo GX4199, México D.F, México). Cada análisis se realizó por triplicado, de acuerdo a los métodos de la AACC (2000). La humedad se obtuvo por secado en estufa a 100-105 °C por 24 h en el caso de harinas y pan y por 48 h en el grano entero (Método 44-15.02 y 44-15.01). La ceniza se determinó por incineración a 500°C por 4 h (Método 08-01.01). Se determinó el nitrógeno por la técnica micro-Kjeldahl, utilizando 6.25 como factor de conversión para obtener el contenido de proteína de garbanzo, maíz, harinas multigrano, panes multigrano y pan integral y 5.83 para la avena y trigo (Método 46-13.01). El contenido de lípidos se determinó por el método Goldfish (Método 30-25.01).

5.3 Condiciones de Procesamiento

Previo a la nixtamalización definitiva de los granos, se realizó el siguiente experimento por duplicado para establecer los tiempos de cocimiento, secado y molienda para el garbanzo, maíz y trigo. Primero se limpió el grano y se colocó en bolsas de manta. Se utilizó agua en relación 1:3 con respecto al grano y 3 % de cal en relación al agua, el cocimiento se llevó a cabo en ollas de peltre con tapadera y una vez que la solución hirvió se agregaron los granos. El maíz y el garbanzo fueron cocidos durante cuatro tiempos: 15, 30, 45 y 60 min, transcurrido el tiempo los granos se dejaron reposar 20 h por separado. El trigo se dejó reposar por el mismo tiempo en una solución de agua y cal previamente hervida y atemperada a 65 °C con agua corriente, es decir el trigo no fue sometido a cocimiento. Posteriormente, todos los granos se lavaron con agua corriente y se dejaron escurrir sobre papel estraza por 15 min para remover exceso de agua. Los granos se secaron en un secador de convección Micro Pak serie MP500 (Enviro-Pak, Oregon, EUA) a 48-52 °C por 6 h.

Finalmente, los granos nixtamalizados y secos se molieron en un molino de martillos marca Pulvex modelo 200 (Pulvex S.A de C.V, México D.F, México) con una malla de 0.8 mm. Las harinas se almacenaron en bolsas de plástico a temperatura ambiente. Las mediciones realizadas a cada muestra con su respectivo duplicado fueron las siguientes: en el grano nixtamalizado con y sin reposo se determinó humedad y la fuerza de penetración en el grano expresada en newtons (N). Para esta prueba se utilizó un texturómetro TA-XT2 (Texture Technologies Corp., Nueva York, EUA) con una velocidad de prueba de 1.5 mm/s y distancia de 3 mm. Durante el secado, se determinó el contenido de humedad durante cada hora en todos los granos. En las harinas se les evaluó el contenido de humedad (por triplicado) y para la evaluación de las propiedades viscoamilográficas las muestras fueron reprocesadas en un molino Cyclotec 1093 marca FOSS Tecator (Suecia) con una malla de 0.5 mm.

Se obtuvieron los perfiles viscoamilográficos (por duplicado) utilizando un analizador rápido de viscosidad (RVA) modelo Super 4 (Newport Scientific Pvt. Ltd, Australia) de acuerdo al procedimiento "Estándar 1" proporcionado por el fabricante. La prueba comienza a 50°C y después de 1 min la temperatura aumenta a un ritmo de 9.5 °C/ min hasta llegar a los 95 °C y se mantiene por 2.5 min, posteriormente la temperatura baja 13.5 °C/min hasta llegar a 50°C y se mantiene ahí por 2 min completando los 13 min de prueba. De la gráfica se reportaron los valores de temperatura de empaste (°C), viscosidad pico, trough, breakdown, viscosidad final, setback y tiempo pico, expresado en cP. En las masas se realizó el análisis de perfil de textura (TPA) utilizando el analizador de textura TA-XT2 (Texture Technologies Corp., Nueva York, EUA) con un aditamento cilíndrico (plástico) de 38 mm de diámetro, la velocidad de prueba fue de 5 mm/s y la distancia de 10.5 mm. Para efectuar el análisis se rehidrataron las harinas a un contenido de humedad fijo (60 % para el trigo, 100 % para maíz y 80 % para garbanzo) y se realizó el TPA por triplicado de cada duplicado.

5.4 Nixtamalización

Una vez obtenidas las condiciones de procesamiento se nixtamalizó el maíz y garbanzo por duplicado bajo 4 tratamientos: 1) nixtamalización con choque térmico a $\sim 30^{\circ}\text{C}$ (tratamiento 1); 2) nixtamalización con choque térmico a $\sim 1^{\circ}\text{C}$ (tratamiento 2); 3) nixtamalización tradicional (control), es decir sin choque térmico y 4) el control que fueron los granos sin ningún tratamiento (natural). El procedimiento a seguir fue el siguiente: el grano limpio se depositó en bolsas de tela de manta para posteriormente cocerlos. Se utilizó una relación 1:3 de grano:agua, 3% de cal en relación al agua, la cocción fue de 30 min para el maíz y 45 min para el garbanzo a $\sim 92^{\circ}\text{C}$ en ollas de peltre con tapadera agitando cada 5 minutos.

Inmediatamente terminada la cocción del grano, éste se trasladó a otras ollas con agua a $\sim 30^{\circ}\text{C}$ o $\sim 1^{\circ}\text{C}$ para dar el choque térmico según fuera el tratamiento; la cantidad de agua fue el doble de lo que se utilizó para el cocimiento. El agua a temperatura ambiente fue de 28.6 ± 0.6 y en el caso del choque a $\sim 1^{\circ}\text{C}$, se logró combinando hielo con agua a temperatura de 9°C , la temperatura final fue de 0.86 ± 0.3 . El grano se dejó reposar por 15 min tomando lectura de temperatura cada 5 min con un termómetro de láser marca Cooper. Transcurrido el tiempo, los granos se regresaron a la olla de cocimiento con el nejayote y se dejó reposar por 20 h. En el caso de la nixtamalización tradicional, después del cocimiento los granos permanecieron por 20 h en la misma olla de cocimiento. El trigo se dejó reposar por el mismo tiempo en agua y cal previamente hervida y atemperada a 62°C añadiendo agua a temperatura ambiente, es decir, el grano no fue sometido a cocimiento.

Transcurrido el tiempo de reposo, los granos se lavaron con agua corriente para remover el exceso de cal y se dejaron escurrir sobre papel estraza durante 15-20 min. Posteriormente los granos se sometieron a un secado convectivo utilizando un horno de convección Micro Pak serie MP500 (Enviro-Pak, Oregon, EUA) donde se secaron a 50

± 2 °C por 5.5 h para el trigo, 7 h para el maíz y 8 h para el garbanzo. Por último, se molieron los granos y las hojuelas de avena en un molino pulverizador marca Pulvex modelo 200 (Pulvex S.A de C.V, México D.F) con malla de 0.4 mm. Las harinas obtenidas se envasaron en bolsas de plástico y se almacenaron en refrigerador a 9 °C para su posterior análisis. En todos los casos, los granos fueron procesados por separado para cada tratamiento.

Finalmente se obtuvieron duplicados de harinas de maíz y garbanzo para cada tratamiento de nixtamalización. Es decir, maíz nixtamalizado tradicionalmente, maíz con choque a $\sim 30^{\circ}\text{C}$ y maíz con choque térmico a $\sim 1^{\circ}\text{C}$ y lo mismo para el garbanzo. En el caso del trigo se obtuvo harina de trigo natural y harina de trigo “nixtamalizado” (“nixt”) y por último la harina de avena. Estas harinas se denominaron “harinas individuales”. Se determinó la humedad de todas las harinas y posteriormente se almacenaron en bolsas de plástico en cámara de refrigeración a 9°C para su futuro análisis individual. Por último, se elaboraron las mezclas de harinas para obtener la harina multigrano.

5.5 Almidón Resistente

Se determinó el contenido de almidón resistente a cada una de las harinas individuales obtenidas con el fin de evaluar el efecto de los tratamientos de acuerdo con el método 32-40.01 (AACC, 2000), utilizando un kit comercial para almidón resistente (Megazyme Irlanda Internacional, Bray, Irlanda). Se pesaron 100 ± 5 mg de muestra directamente en un tubo con tapa de rosca. El almidón no resistente se determinó por medio de solubilización e hidrólisis enzimática, con la acción combinada de α -amilasa pancreática y amilogucosidasa (AMG), para la cual se incubaron los tubos con muestra en baño de agua con movimiento a 37°C por 16 h. Se detuvo la reacción con etanol al 96 % y se

centrifugó a 2,500 g y se realizaron dos lavados más con etanol al 50 % y se recuperó el sobrenadante (almidón soluble).

Al pellet obtenido se le agregó una solución de KOH 2M y se mezcló en un baño de agua con hielo. Se neutralizó la solución con búfer de acetato de sodio (pH 3.8) para después hidrolizar nuevamente con AMG en incubación a 50 °C por 30 min. Posteriormente, se centrifugaron los tubos por 10 min a 2,500 g y se tomaron alícuotas por duplicado del sobrenadante de RS y de almidón soluble obtenido anteriormente. Posteriormente se agregaron 3 mL de reactivo GOPOD a cada alícuota y se incubó por 20 min a 50°C. Por último para determinar el contenido de RS y almidón soluble, se cuantificó la glucosa liberada por medio de lectura a 510 nm en un espectrofotómetro Varian® modelo Cary 50, Australia. Los resultados se expresaron en g/100g base seca.

5.6 Formulación Multigrano

Se probaron tres formulaciones multigrano mezclando diferentes proporciones de trigo, maíz, garbanzo, avena y aislado de soya (Tabla 3) en base al 14% de humedad. De cada formulación se obtuvieron dos mezclas: una llamada “natural”, en la cual las harinas utilizadas para realizar la mezcla no recibieron ningún tratamiento; y la segunda denominada “con tratamiento” en la cual se empleó la harina de trigo “nixtamalizado” y el maíz y garbanzo con el tratamiento que generó mayor RS, mientras que la avena y aislado de soya fue el mismo. Finalmente se obtuvieron dos harinas de cada formulación a las cuales se les evaluaron las propiedades viscoamilográficas y se efectuaron pruebas de panificación. En base a los resultados obtenidos en estas pruebas, se seleccionó una de las tres formulaciones.

Tabla 3. Formulaciones multigrano			
(%)	Formulación 1 (F1)	Formulación 2 (F2)	Formulación 3 (F3)
Trigo	80	70	68
Garbanzo	9	19	15
Avena	7	7	11
Maíz	3	3	5
Soya	1	1	1

Las propiedades viscoamilográficas se analizaron por triplicado utilizando un analizador rápido de viscosidad (RVA) modelo Super 4 (Newport Scientific Pvt. Ltd, Australia) de acuerdo al procedimiento “Estándar 1” proporcionado por el fabricante. Los mixogramas se realizaron de acuerdo con el método 54-40.02 (AACC, 2000) por triplicado o hasta obtener reproducibilidad y la prueba de panificación se efectuó por duplicado de acuerdo al método 10-10.03 (AACC, 2000). El volumen específico se determinó de acuerdo al método 55-50.01 (AACC, 2000), dividiendo el volumen entre el peso del pan. La miga del pan se evaluó visualmente y con base a estas pruebas se seleccionó una formulación para finalmente tener un pan natural y otro con tratamiento de una misma formulación. Adicionalmente, se determinó la composición proximal de los panes elaborados de acuerdo a los métodos ya mencionados.

5.7 Estimación de Índice Glucémico *in vitro*

Una vez seleccionada una formulación, la estimación del índice glucémico *in vitro* se determinó por duplicado al pan natural (pan multigrano elaborado con harinas sin nixtamalizar) y al pan con tratamiento de acuerdo con el método establecido por Goñi *et al.* (1997) modificado. Los panes se molieron en un molino marca Krups® (Modelo GX4100, México DF, México) y se almacenó en refrigeración en bolsas de plástico. Se

pesaron 100 ± 0.05 mg de muestra de pan fresco en tubos con tapa de rosca y se sometieron a incubación a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 0, 30, 60, 90 y 120 min con la acción combinada de α -amilasa pancreática y amiloglucosidasa (AMG). Transcurrido el tiempo se detuvo la reacción con etanol 96 %, se centrifugó a 2,500 g y se recuperó el sobrenadante. Se realizaron dos lavados más con etanol 50 % y se recuperó el sobrenadante para obtener el almidón soluble, el cual se estabilizó con búfer de acetato de sodio pH 4.5.

Se tomaron alícuotas por duplicado de cada muestra y se incubaron por 20 min a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ con AMG diluida ($300\text{u}/\mu\text{L}$). Posteriormente se agregó el reactivo GOPOD, se incubó nuevamente a la misma temperatura y por el mismo tiempo y finalmente se leyó la absorbancia a 510 nm en un espectrofotómetro Varian® modelo Cary 50, Australia. Se obtuvo el porcentaje de almidón hidrolizado enzimáticamente a los 4 tiempos para cada pan, con lo que se obtuvieron curvas de hidrólisis. El índice de hidrólisis (HI) se calculó como la relación entre el área bajo la curva de la muestra y el área bajo la curva del estándar (pan blanco comercial). El IG estimado se calculó utilizando la siguiente ecuación: $\text{IG} = 39.71 + 0.549\text{HI}$ (Goñi *et al.*, 1997).

5.8 Análisis Estadístico

Para la caracterización fisicoquímica se realizó una estadística descriptiva, expresando los valores de la media y desviación estándar. Para el establecimiento de las condiciones de procesamiento, los datos se analizaron individualmente para maíz y para garbanzo, se realizó una prueba t-student para las variables de respuesta de humedad y dureza de grano tomando como factor el reposo (con y sin) para los cuatro tiempos de cocción. Mientras que se realizó un diseño completamente al azar de una sola vía donde el factor de variación fue el tiempo de cocción (15, 30, 45 y 60 min) para las variables de humedad de harina, TPA de masa y perfil viscoamilográfico de harinas. Para la nixtamalización se realizó un diseño completamente al azar donde el factor de

variación fue el tratamiento (grano natural, nixtamalización tradicional, nixtamalización con choque térmico a 30 °C y nixtamalización con choque térmico a 1 °C). Los datos se analizaron individualmente para maíz y para garbanzo, las variables de respuesta fueron humedad de grano al inicio y final del secado convectivo, humedad de harina, almidón resistente y perfil viscoamilográfico (temperatura de empaste, viscosidad pico, trough, breakdown, viscosidad final, setback y tiempo pico).

Para la caracterización de harinas multigrano, prueba de panificación y estimación de índice glucémico *in vitro* se realizó un ANOVA de una sola vía. Las variables de respuesta fueron humedad y perfil viscoamilográfico (temperatura de empaste, viscosidad pico, trough, breakdown, viscosidad final, setback y tiempo pico) volumen específico y el índice glucémico e índice de hidrólisis, respectivamente. Cuando se encontraron diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey-Kramer a un 95 % de confiabilidad. Cuando no se encontró igualdad de variancias se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis (valor $z > 1.96$). Cuando no se encontró homogeneidad de varianzas en la prueba t-student se utilizó la prueba de Aspin-Welch. Se utilizó el paquete estadístico NCSS 2007 para todas las pruebas estadísticas.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización Físicoquímica

La Tabla 4 muestra el peso hectolítrico de los granos utilizados. El peso hectolítrico es el criterio más utilizado para determinar la calidad de los cereales. Este parámetro se relaciona con la densidad real del grano y la densidad del grano está determinada por la estructura biológica y composición química, incluyendo el contenido de humedad (Halverson *et al.*, 1988). Además, está relacionado con la textura del endospermo o con el contenido de proteína y estado de salud, ya que los granos dañados (grano chupado, inmaduro o enfermo), tienen un peso hectolítrico más bajo que los sanos y los granos vítreos (más proteína) contienen una densidad mayor. Los lotes con mayor humedad tienen menor peso hectolítrico (Serna-Saldívar, 1996). El peso hectolítrico es un indicador del rendimiento de molienda, ya que un peso hectolítrico mayor indica un mayor llenado del grano por lo que se esperaría un mejor rendimiento (Peña-Bautista *et al.*, 2008).

El trigo utilizado presentó un valor de peso hectolítrico de 79.27 ± 0.25 kg/hL y de acuerdo con la NMX-FF-036-1996 clasificaría como México calidad 1, ya que el mínimo requerido para esta categoría es 76 kg/hL, esto indica que el trigo que se utilizó fue de calidad panadera, con un llenado de grano adecuado para su posterior molienda. En cuanto al maíz se obtuvo un valor de alrededor de 80.85 kg/hL y de acuerdo con la NMX-F-034/1-SCFI-2002 la densidad mínima es de 74 kg/hL para maíz destinado a la elaboración de productos de maíz nixtamalizado de calidad comercial, mientras que en la literatura Gutiérrez-Urbe *et al.* (2010) reportaron 80.66 kg/hL para maíz blanco. Por

esto el maíz utilizado fue de calidad y apto para su posterior transformación, ya que un maíz con peso hectolítrico bajo se relaciona con un endospermo más duro y con menor rendimiento de molienda en seco (Rutledge, 1978). El peso hectolítrico del garbanzo fue de 79.34 kg/hL y el de hojuela de avena fue de 34.78 kg/hL, aunque este fue medido solo como referencia de control interno, ya que este parámetro no es utilizado para medir la calidad de este producto.

Tabla 4. Peso hectolítrico y peso de mil granos de los distintos granos		
Grano	Peso hectolítrico kg/hL	Peso de mil granos (g)
Trigo	79.27 ± 0.25	47.4 ± 0.73
Garbanzo	79.34 ± 0.8	742.6 ± 7.71
Maíz	80.85 ± 0.19	348.66 ± 5.46
Avena*	34.78 ± 0.37	-

Los valores son la media de cuadruplicados ± desviación estándar. *Avena en hojuelas.

El peso de mil granos al igual que el peso hectolítrico es una referencia del estado de salud del grano, ya que un grano chupado, quebrado o con poco endospermo pesará menos y también se le relaciona con el contenido de proteína, ya que un peso mayor podría indicar un mayor contenido de proteína (gluten, en el caso del trigo) o bien un endospermo más harinoso en el caso del maíz (Serna-Saldívar, 1996). El peso de mil granos del maíz es un indicador del tamaño del grano y para productos nixtamalizados se desea un tamaño de grano mayor (Billeb de Sinibaldi *et al.*, 2001). El valor obtenido en el maíz es característico de maíces utilizados para la obtención de nixtamal o de harina, ya que valores mayores a 300 g o bien alrededor de 343 g se encuentran dentro de lo normal (Figuroa-Cárdenas *et al.*, 2013; Jiménez-Juárez *et al.*, 2012; Serna-Saldívar *et al.*, 1993).

La Tabla 5 muestra la composición proximal de los granos. La humedad del trigo se encontró dentro de los rangos normales. La NMX-FF-036-1996 determina una humedad

máxima permisible del 13 %, por lo que el grano de trigo utilizado se encuentra dentro de la norma. El contenido de humedad es un factor importante en el grano, ya que es clave para la proliferación de microorganismos degenerativos. Para el maíz la humedad fue de 10.07 %, este valor se encuentra dentro de los valores normales, ya que el máximo permitido por la NMX-F-034-SCFI (2002) es de 14 %, así como lo reportado por otros autores (Fernández-Muñoz *et al.*, 2004). La humedad obtenida en el garbanzo fue de 7.12 %, la cual es la más baja de todos los granos analizados, y se encuentra alrededor de lo reportado por otros autores (6.9-8.78 %) (Hughes *et al.*, 2009; Sotelo *et al.*, 1987).

Los valores encontrados de ceniza y grasa para todos los granos y las hojuelas de avena, se encuentran alrededor de lo encontrado por otros autores. Para trigo se reportan valores de 1.48 a 3.3 % y 1.34 a 1.65 %; garbanzo 4.16 a 6.6 % y 2.8 a 3.5 % y para avena 6.10 a 9.25 % y 1.75 a 1.80 % de grasa y ceniza respectivamente (Angioloni *et al.*, 2012b; Angioloni *et al.*, 2013; Rachwat *et al.*, 2013). El alto contenido de lípidos en la avena es característico ya que es el cereal con mayor contenido de lípidos (Koehler *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2010).

Tabla 5. Composición proximal de los granos				
Componente (%)	Trigo	Garbanzo	Maíz	Avena
Humedad	9.93 ± 0.03	7.12 ± 0.05	10.07 ± 0.06	8.10 ± 0.12
Ceniza	1.55 ± 0.01	3.28 ± 0.20	1.18 ± 0.01	1.85 ± 0.02
Grasa	1.14 ± 0.05	5.71 ± 0.05	4.22 ± 0.04	6.32 ± 0.09
Proteína	15.53 ± 0.37	24.6 ± 0.5	8.98 ± 0.12	13.36 ± 0.06

Los valores son la media de triplicados ± desviación estándar

En cuanto al contenido de proteína, es de los parámetros más importantes en el trigo, ya que representa de manera indirecta el contenido de gluten. Se encontró un valor de

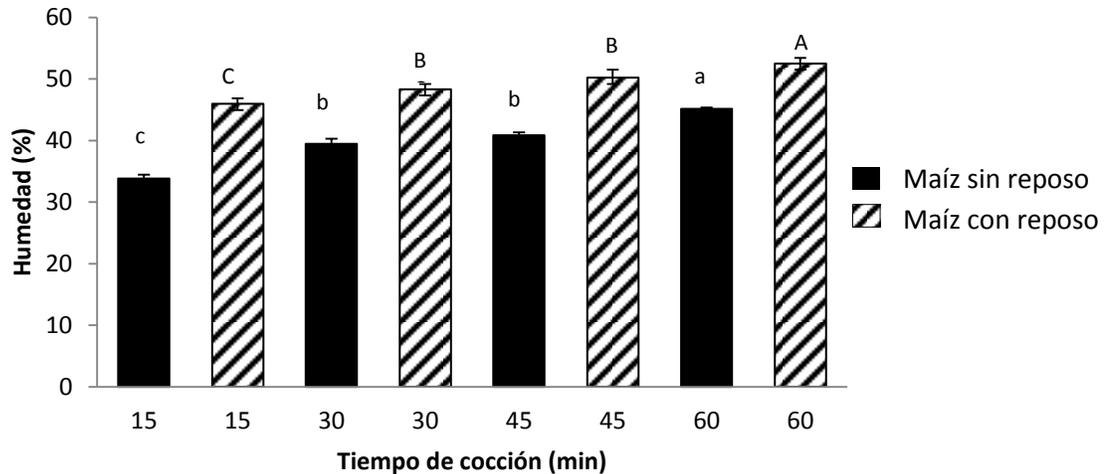
alrededor de 15.5 %, el cual es un poco alto para ser un trigo panadero ya que otros autores han reportado valores de 12.2 % a 14.13 % (Angioloni *et al.*, 2012b; Angioloni *et al.*, 2013). Sin embargo, esto podría indicar un alto contenido de gluten, lo cual ayudaría a mejorar la funcionalidad de las harinas debido a sus propiedades viscoelásticas.

Así mismo, el contenido de proteína fue mayor en el garbanzo (24.6 %) que en el resto de los granos y hojuelas de avena, esto debido a que es una leguminosa y en este grano se ha reportado un contenido de proteína que oscila entre 18.1 a 29 % dependiendo de la especie y la variedad, así como las condiciones ambientales durante su cultivo y almacenamiento (Boye *et al.*, 2010; Oomah *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2004). En el maíz se reportan valores de proteína de 9.2 a 10.27 % y 11.1 a 16.9 % en avena, por lo que los valores encontrados en este trabajo se encuentran dentro de lo reportado (Angioloni *et al.*, 2013; Flores-Farías *et al.*, 2000; Kent, 1984).

6.2 Condiciones de Procesamiento

Las Figuras 1 y 2 muestran el contenido de humedad del grano de maíz y garbanzo nixtamalizado con reposo y sin reposo, respectivamente. Se observa que en ambos granos la humedad aumentó significativamente ($P \leq 0.05$) con el reposo para todos los tiempos de cocimiento, en promedio 10.52 % para el garbanzo y un 9.41 % para el maíz. Este último, es un poco mayor a lo reportado por Martínez-Bustos *et al.* (2001) quienes observaron un aumento en el contenido de humedad de 7.5 %. Esta diferencia puede atribuirse a diferencias en la concentración de la cal (1.5%) y al tiempo de reposo (15 h), que fueron menores a los empleados en este estudio, o bien a la dureza inicial del grano. Billeb de Sinibaldi *et al.* (2001) reportaron valores de humedad de 40.29 a 43.37 % para maíz nixtamalizado cocido por 50 min sin reposo, mientras que Ruiz-Gutierrez *et al.* (2010) reportaron valores de humedad entre 40 y 44 % para maíz

nixtamalizado por 60 min sin reposo, los cuales son similares a los obtenidos en este estudio (40.84 y 45.6 % para 45 y 60 min de cocción, respectivamente).



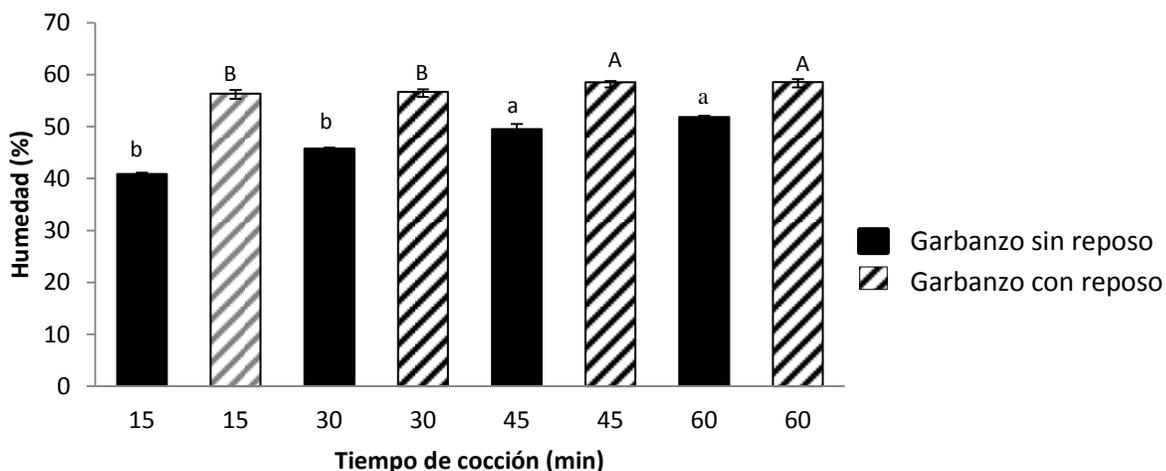
Letras minúsculas distintas entre tiempos de cocción sin reposo representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$) Letras mayúsculas entre tiempos de cocción con reposo representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

Figura 1. Humedad del grano de maíz nixtamalizado a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo

Así mismo, los valores de humedad al finalizar el reposo del grano de maíz fueron en aumento conforme aumentó el tiempo de cocimiento: 45.95 %, 48.30 %, 50.19 % y 52.48 % para 15, 30, 45 y 60 min de cocimiento. Ruiz-Gutierrez *et al.* (2010), Sefaddeh *et al.* (2004) y Serna-Saldívar *et al.* (1993) reportaron valores de humedad de 46.3-56 %, 48.5-59.3 %, 50.9-63.3 % y 45-59 % para 15, 30, 45 y 60 min de cocción, respectivamente, los cuales son similares a los obtenidos en este estudio. De acuerdo a diversos autores, la humedad deseable en el nixtamal es de 48-50 % o bien 42-44 % ya que con estos porcentajes de humedad, la masa resultante tiene las características deseables de textura (i.e. cohesividad, adhesividad) (Arámbula-Villa *et al.*, 2001a; Gomez *et al.*, 1991a).

Además, se observó que en ambos granos la diferencia entre la humedad del grano con y sin reposo por tiempo de cocción disminuyó conforme aumentó el tiempo de cocción,

lo cual se debe a que conforme aumenta el tiempo de cocción hay mayor cantidad de gránulos de almidón hinchados por tanto hay menor disponibilidad de gránulos para absorber agua durante el reposo, por lo que la diferencia entre la humedad del grano con y sin reposo resultará menor.



Letras minúsculas distintas entre tiempos de cocción sin reposo representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$). Letras mayúsculas entre tiempos de cocción con reposo representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

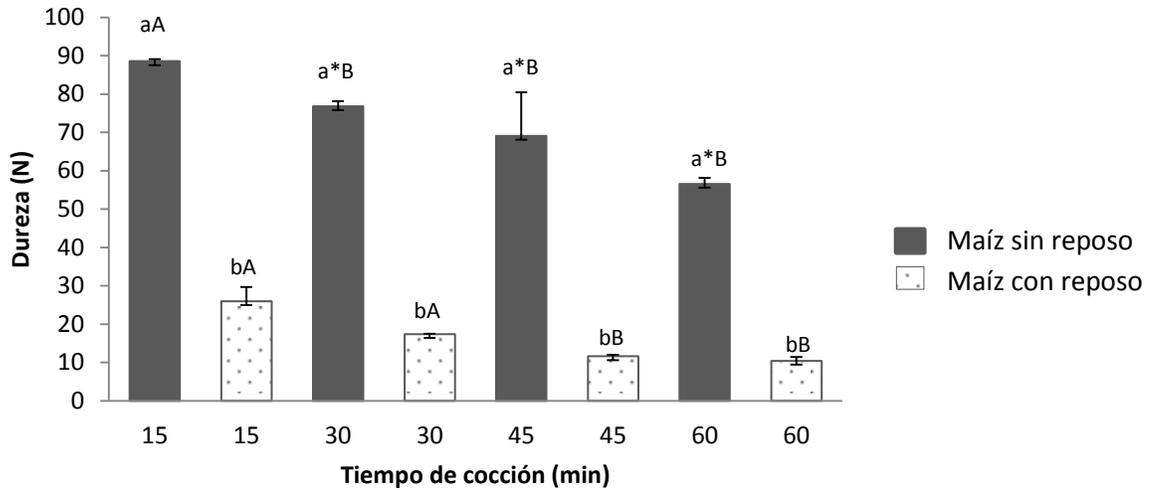
Figura 2. Humedad del grano de garbanzo nixtamalizado a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo

Adicionalmente, en ambos granos se observó diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre el grano con reposo y el grano sin reposo. Al comparar entre los tiempos de cocción sin reposo se observó que no hubo diferencia entre la cocción por 30 y 45 min pero sí a los 15 o 60 min, mientras que al comparar entre los tiempos de cocción con reposo, sólo la humedad a los 60 min resultó diferente a las demás, no hubo diferencia entre la humedad a los 45 y a los 30 min y lo mismo para la humedad entre los 15 y 30 min de cocción. En el garbanzo tanto con reposo como sin reposo se observó que no hubo diferencia entre los 15 y 30 min ni entre los 45 y 60 min de cocción. Estos resultados indican que en el caso del maíz el tiempo de cocción es más crítico ya que observaron más diferencias entre los tiempos de cocción, mientras que para el garbanzo las diferencias fueron significativas cada 30 min de cocción. Esto se puede deber a que el

grano de garbanzo es más duro que el maíz por lo que la absorción de agua es más lenta.

El aumento en el contenido de humedad es debido a que durante la cocción los granos absorben agua conforme aumenta la temperatura y tiempo de cocción, el pericarpio (el cual es una barrera para la absorción de agua) se ablanda facilitando la penetración de agua y calcio hacia el germen y al interior del grano pero sin alcanzar el equilibrio, éste se alcanza durante el reposo (Martínez-Bustos *et al.*, 2001; Ruiz-Gutierrez *et al.*, 2010). Además, conforme se incrementa el tiempo y temperatura de cocción, el almidón se gelatiniza parcialmente y por tanto la absorción de agua hacia el interior de los gránulos de almidón es más fácil y rápida (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004).

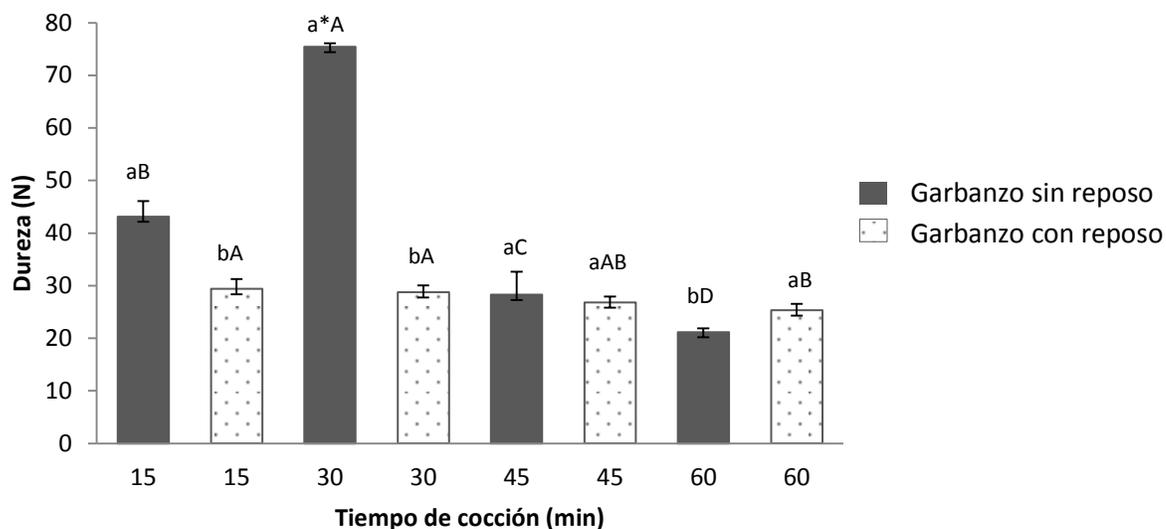
En cuanto a la dureza del grano, las Figuras 3 y 4 muestran los cambios en la dureza del grano a los cuatro tiempos de cocción para maíz y garbanzo, respectivamente. En el maíz (Figura 3), al comparar entre con y sin reposo por tiempos de cocción, se encontró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en los cuatro tiempos de cocción, lo que indica que para todos los tiempos de cocción el reposo tiene efecto significativo en la reducción de la dureza. Al comparar entre tiempos de cocción sin reposo, se observó que sólo el maíz con 15 min de cocción fue estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$). Al comparar entre tiempos de cocción con reposo, se observaron cambios significativos hasta los 30 min de cocción. Estos resultados indican que el efecto del tiempo de cocimiento es más significativo cuando se realiza el reposo que cuando no se realiza.



Letras minúsculas diferentes por cada tiempo de cocción con y sin reposo indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$). Letras mayúsculas diferentes por reposo o sin reposo entre todos los tiempos de cocción indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$). * Comparación por prueba no paramétrica de Aspin-Welch.

Figura 3. Dureza del grano de maíz a diferentes tiempos de cocción con y sin reposo

En el grano de garbanzo (figura 4), al comparar entre con y sin reposo por tiempos de cocción, se encontró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en todos los tiempos de cocción con excepción del tiempo 45 min. Al comparar entre tiempos de cocción con reposo se encontró que todos los tiempos de cocción fueron significativamente diferentes entre sí ($P \leq 0.05$), mientras que entre los con reposo, se observó cambio significativo hasta los 60 min de cocción, lo que indica que, contrario al maíz, el efecto del tiempo de cocción fue más significativo si el grano no se reposa. En general, se observó que ambos granos tuvieron una tendencia a disminuir significativamente su dureza conforme aumentó el tiempo de cocimiento, tanto en el grano reposado como sin reposar. Se observó que la dureza disminuyó aún más con el reposo, sin embargo fue más notoria para el maíz que para el garbanzo, es decir, hubo mayor diferencia de dureza en el grano reposado y sin reposar de maíz que en el garbanzo. Esto se puede deber a que el grano de maíz es mucho más blando que el garbanzo, que es una leguminosa y naturalmente más duro.



Letras minúsculas diferentes por cada tiempo de cocción con y sin reposo indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$). Letras mayúsculas diferentes por reposo o sin reposo entre todos los tiempos de cocción indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$). * Comparación por prueba no paramétrica de Aspin-Welch.

Figura 4. Dureza del grano de garbanzo con y sin reposo a diferentes tiempos de cocción

El cambio en el contenido de humedad durante el secado convectivo de maíz, garbanzo y trigo se muestra en la Figura 5. Los tres granos presentaron un comportamiento normal de un secado convectivo, es decir, en las primeras horas de secado se observó una disminución rápida de humedad, mientras que en las últimas dos horas, hubo menor pérdida de humedad para todos los granos. La humedad inicial del grano de maíz nixtamalizado fue de 45.94, 48.29, 51.19 y 52.48 % y del garbanzo nixtamalizado fue de 56.33, 56.68, 58.52 y 58.56 % para 15, 30, 45 y 60 min de cocimiento, y al finalizar el secado se obtuvieron valores de 13.48, 14.76, 16.91 y 16.78 % para maíz y 23.28, 23.93, 25.59 y 24.55 % para el garbanzo. En ambos casos la humedad final de los granos estuvo alta, ya que el límite establecido por la NOM-247-SSA1-2008 es de ≤ 14.5 % para el almacenamiento de granos.

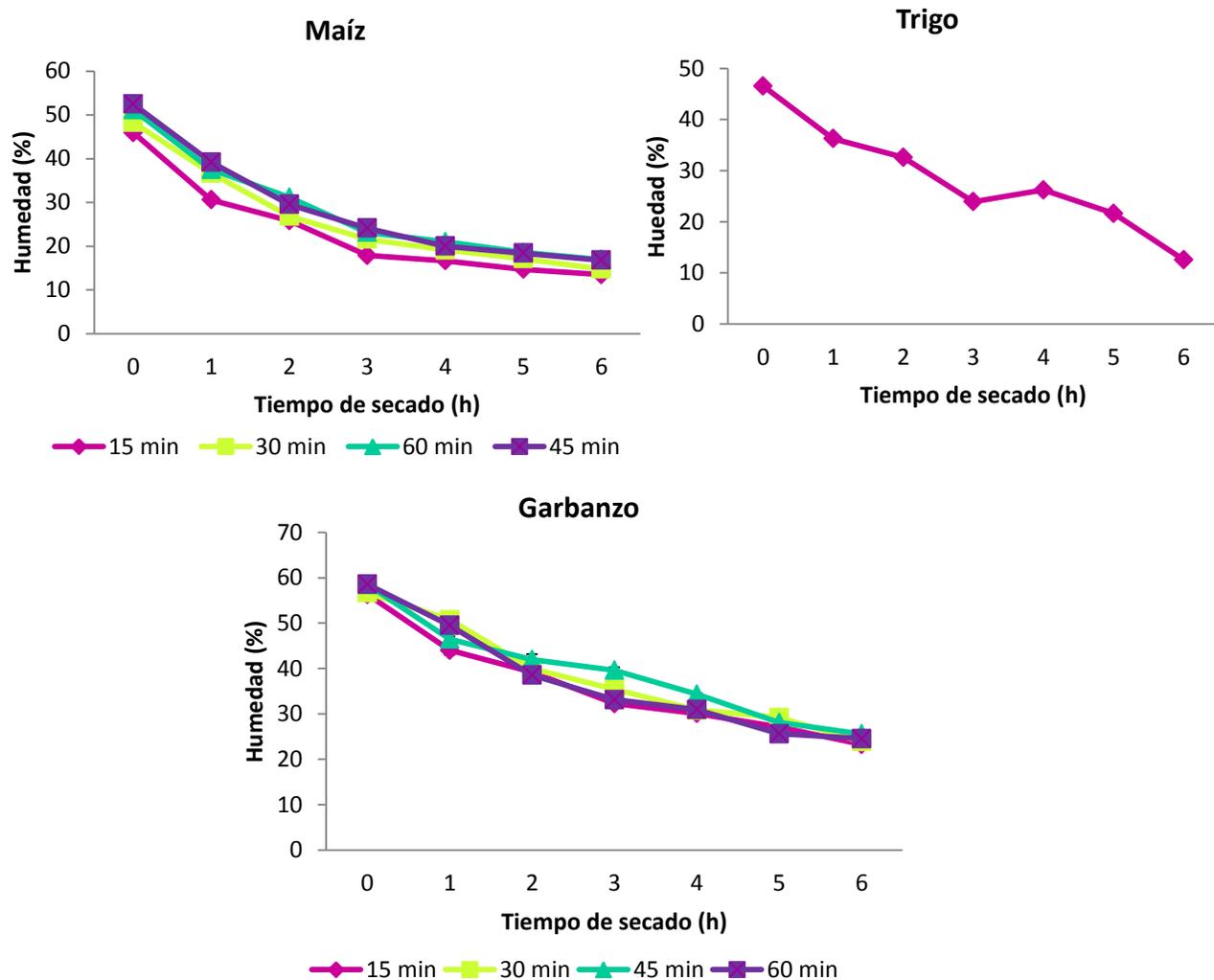


Figura 5. Curvas de secado convectivo de maíz, trigo y garbanzo

Además, considerando que el grano se molería posteriormente para obtener harina, la cual no debe exceder del 14 % de humedad en el caso del maíz y en trigo debe encontrarse entre 13 y 15% (NMX-FF-034-1-SCFI-2002; NMX-FF-036-1996; NOM-247-SSA1-2008) fue de esperarse que las harinas obtenidas no estuvieran dentro del rango de humedad recomendado. Una vez obtenidas las harinas, esto se corroboró con el análisis de humedad (Tabla 6), en donde todas las harinas con excepción de la de trigo “nixtamalizado” y del maíz con 15 min de cocción, sobrepasan el 14 % de humedad. En el caso del garbanzo, se obtuvieron valores de humedad de hasta 22.9 %, mientras que

en el maíz el valor más alto fue de 15.9 %. Con estos resultados se concluyó que el tiempo de 6 h de secado no fue suficiente para obtener una harina con humedad ≤ 14 %, por lo que se decidió aumentar el tiempo de secado para el maíz y aún más para el garbanzo.

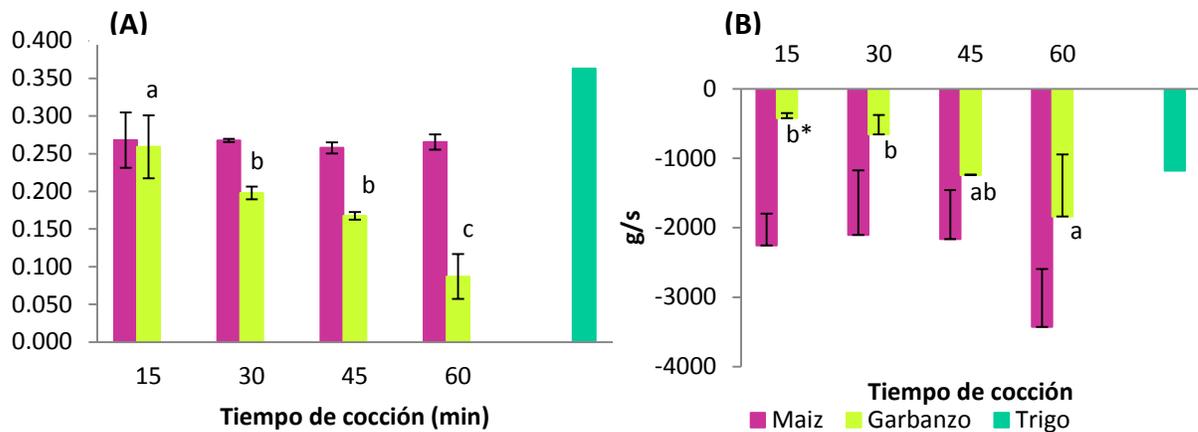
Tabla 6. Humedad de harinas nixtamalizadas a distintos tiempos de cocción			
Tiempo de cocción	Maíz (%)	Garbanzo (%)	Trigo (%)
15 min	13.73 \pm 0.07	19.13 \pm 1.27	
30 min	15.6 \pm 0.84	22.2 \pm 0.21	
45 min	15.27 \pm 0.71	22.98 \pm 0.74	
60 min	15.90 \pm 0.41	19.53 \pm 0.55	
-			12.36 \pm 1.02

Los valores son la media de triplicados \pm desviación estándar.

En el análisis de perfil de textura de la masa, la cohesividad y la adhesividad son los parámetros más importantes. La cohesividad se refiere a que tanto puede deformarse un cuerpo antes de romperse y se mide haciendo una relación entre el área de la segunda compresión con el área de la primera (Bourne, 2002). Esto se relaciona con la fuerza de las interacciones entre las moléculas de los diferentes componentes de la masa, ya que una interacción débil resulta en valores bajos y en una masa que se rompe fácilmente y es poco moldeable, mientras que una interacción más fuerte resultará en una masa con mayor resistencia a la deformación y será más manejable (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009).

En el maíz, la cohesividad no mostró cambios significativos ($P \geq 0.05$) durante la nixtamalización a los diferentes tiempos de cocción (Figura 6a) y los valores obtenidos fueron ligeramente mayores a lo reportado por Jiménez-Juárez *et al.* (2012) pero muy similares a los de Flores-Farías *et al.* (2000) quienes reportaron que el grano se coció por 55 min a 85 °C. En el garbanzo la cohesividad disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) conforme aumentó el tiempo del cocimiento, lo que significa que el tiempo de

cocimiento tiene mayor efecto en el garbanzo que en maíz, haciéndolo menos cohesivo y por tanto menos manejable.



Letras diferentes entre tiempo de cocción por grano representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$).
Comparación de medias por prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (valor de $z < 1.96$)

Figura 6. Cohesividad y adhesividad de las masas de maíz y garbanzo a distintos tiempos de cocción.

La adhesividad se refiere a la fuerza necesaria para despegar la masa de una superficie y esto se traduce en el manejo de la masa en el equipo de procesamiento. La adhesividad es deseable para que el material se pueda troquelear, ya que sin adhesividad no se obtiene la consistencia necesaria, sin embargo una masa demasiado adhesiva se vuelve pegajosa y poco manejable (Antuna-Grijalva *et al.*, 2008). Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que para las masas de ambos granos, la adhesividad se incrementó conforme aumentó el tiempo de cocimiento (Figura 6b), lo cual concuerda con lo reportado por Ramírez-Wong *et al.* (1994) quienes observaron el mismo comportamiento en masas de maíz nixtamalizado. Sin embargo este aumento no fue significativo en la maíz ($P \geq 0.05$) pero sí para el garbanzo ($P \leq 0.05$) Arámbula-Villa *et al.* (2001a), encontraron que valores de adhesividad de la masa de 30-50 g son deseables para la elaboración de tortillas. Es importante resaltar que los valores de adhesividad para el garbanzo fueron mucho menores que los del maíz, esto se debe a que la naturaleza del almidón es diferente y la penetración de agua para el

hinchamiento de los gránulos de almidón es más lenta ya que existen otros factores que interfieren (proteína, grasa, dureza del grano) (Hughes *et al.*, 2009).

Las propiedades viscoamilográficas de las harinas de maíz y de garbanzo nixtamalizado se presentan en la Figura 7. En la fase inicial de calentamiento, el maíz mostró un aumento de viscosidad más pronunciado que el garbanzo, lo que finalmente se tradujo en una mayor viscosidad pico para el maíz que para el garbanzo. Este aumento de viscosidad se debe a que conforme aumenta la temperatura del medio, la cristalinidad del almidón se comienza a perder, los gránulos de almidón empiezan a absorber agua cada vez más y la estructura organizada del almidón se empieza a perder (gelatinización). Como consecuencia de esto, la amilosa lineal se lixivia al medio, lo que provoca un aumento en la viscosidad, esto sigue sucediendo mientras el calentamiento continua (Singh *et al.*, 2003).

La viscosidad pico del maíz disminuyó conforme aumentó el tiempo de cocimiento: 1,241.5, 1,077.5, 1,003 y 828.5 cP para 15, 30, 45 y 60 min de cocimiento, respectivamente. Antuna-Grijalva *et al.* (2008) reportaron un valor de 1,015 cP de viscosidad, el cual es similar a lo encontrado en este trabajo para maíz cocido por 30 y 45 min. La disminución de viscosidad se debe a que esta variable está inversamente relacionada con el grado de gelatinización del almidón. Un almidón gelatinizado y deshidratado, al rehidratarse y calentarse no desarrolla viscosidad, mientras que un almidón nativo tiende a desarrollar al máximo su viscosidad (Arámbula-Villa *et al.*, 2001b).

Diversos autores han evaluado los cambios que ocurren en los gránulos de almidón por efecto del tiempo de cocción y han reportado un mayor daño a la estructura organizada del gránulo conforme aumenta el tiempo de cocción (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009). Por lo tanto, era de esperarse que conforme aumentó el tiempo de cocción existiera mayor gelatinización de almidón y por tanto menor viscosidad al momento de rehidratar y someter a calentamiento la harina. La temperatura a la cual se empieza a

dar este aumento de viscosidad se denomina temperatura de empaste (pasting temperature) y ésta incrementó conforme aumentó el tiempo de cocimiento. Esto indica que los gránulos de almidón necesitaron mayor temperatura para absorber agua y lixiviar amilosa para aumentar la viscosidad del medio.

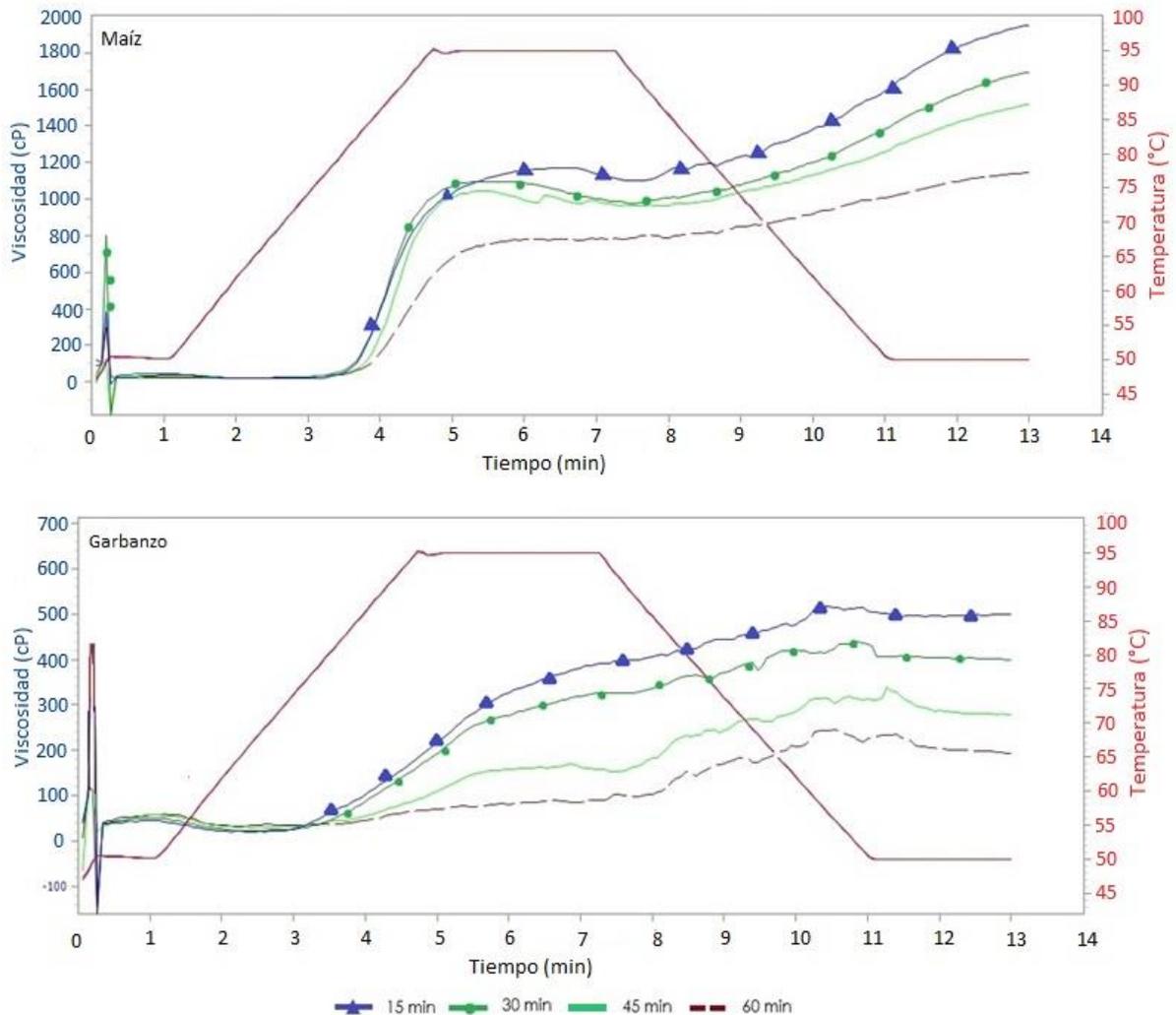


Figura 7. Perfil viscoamilográfico de harinas de maíz y garbanzo nixtamalizado a diferentes tiempos de cocción

En la fase de mantenimiento del análisis, la muestra se mantiene a temperatura (95 °C) constante y estrés mecánico. Durante esta etapa, los gránulos de almidón continúan desorganizándose y la amilosa se continúa lixiviando. Esto generalmente ocasiona una disminución de viscosidad debido a la alineación del almidón (principalmente amilosa)

en la dirección del movimiento de las aspas durante el análisis. Esta disminución de viscosidad, que eventualmente alcanzará un mínimo, se expresa en el valor de viscosidad de pasta caliente (trough). En el maíz y garbanzo se observa que esta disminución de viscosidad es muy baja, lo que significa que la harina es estable ante el estrés mecánico. En el maíz esto se podría relacionar con la presencia del germen, el cual le da mayor tolerancia al mezclado y menos susceptibilidad al quiebre (breakdown) lo que se refleja en una mejor maquinabilidad (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2011). Aún sin embargo, el valor de “trough” tendió a disminuir conforme aumentó el tiempo de cocimiento.

La última etapa del análisis llamada “setback” o “retroceso”, consiste en un enfriamiento del medio a 50 °C y generalmente existe un aumento de viscosidad. El aumento de viscosidad durante esta etapa está asociado con la habilidad de las cadenas de amilosa de re-asociarse por medio de puentes de hidrógeno (retrogradación) y la presencia de gránulos fragmentados embebidos en la matriz de amilosa lixiviada (Flores-Farías *et al.*, 2000). Esto resulta en un gel más firme lo que consecuentemente aumenta la viscosidad final del medio. El valor de setback resulta de la diferencia entre la viscosidad final y el “trough” (Chung *et al.*, 2008).

La viscosidad final de igual forma, disminuyó conforme aumentó el tiempo de cocimiento para ambos granos con valores de 2,047.5, 1695.75, 1,504.25 y 1,252 cP para maíz y 519.5, 408, 317.25 y 289.5 cP para garbanzo nixtamalizado por 15, 30, 45 y 60 min, respectivamente. Este comportamiento, concuerda con lo reportado para maíz en otros estudios (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009). En resumen, la viscosidad disminuyó conforme aumentó el tiempo de cocimiento y en general la viscosidad de la harina de garbanzo fue mucho menor que la del maíz.

El grano de maíz nixtamalizado está constituido por almidón hinchado y gelatinizado y una matriz de proteína que conforman la masa. La amilosa, amilopectina y proteína

forman un sistema como de pegamento, el cual se une al almidón no gelatinizado y células del endospermo intactas en una masa cohesiva. Es por esto que los cambios estructurales que ocurren durante la nixtamalización afectan el comportamiento reológico y químico de la masa y los productos obtenidos de ella (Singh *et al.*, 2003). Se ha reportado que al someter el grano a cocción por 50 o más minutos, la masa tiende a endurecerse más, probablemente porque se incrementa el grado de hinchamiento del almidón, lo que resulta en un grado mayor de gelatinización que en tiempos de cocción menores. Es por esto que relacionando los resultados de humedad de grano, cohesividad, adhesividad y la viscosidad durante el calentamiento-enfriamiento, se llegó a la conclusión que el maíz se sometería a cocimiento por 30 min, tal como en otros estudios (Méndez-Montealvo *et al.*, 2008; Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009).

Sin embargo para el garbanzo, dado que no existen reportes de nixtamalización en este grano, los resultados no fueron concluyentes, aunque de antemano se consideraba que la cocción debía ser mayor a los 30 min debido a los factores antinutricionales que naturalmente contiene el garbanzo (Oomah *et al.*, 2011). Por tanto se realizó una prueba de panificación utilizando garbanzo cocido por 45 min y garbanzo cocido por 60 min en una formulación multigrano compuesta por trigo, maíz y garbanzo. Esto con el fin de ver si las diferencias que se observaron en el perfil de textura y de viscosidad finalmente mostrarían un efecto en la elaboración de un pan. Los resultados de este prueba (no se presentan datos) mostraron que no hubo diferencia significativa en el volumen específico ni en la apariencia del pan en general, por lo que se decidió someter al garbanzo a 45 minutos de cocción.

La distribución del tamaño de partícula es un factor importante para la evaluación de las harinas. Diversos autores han reportado el efecto que tiene un tamaño de partículas fino o grueso sobre la capacidad de absorción de agua, propiedades viscoamilográficas y consecuentemente el producto final (Ramírez-Wong *et al.*, 1994; Singh *et al.*, 2003). Por ejemplo, en las propiedades viscoamilográficas se ha observado que conforme

disminuye el tamaño de partícula, la viscosidad pico aumenta, y esto se atribuye a que en las partículas más finas hay una mayor concentración de gránulos de almidón libres lo que ocasionará un aumento de viscosidad más rápido en el empaste (Gomez *et al.*, 1991b; Sahai *et al.*, 2001).

La Tabla 7 muestra la distribución de tamaño de partículas de las harinas nixtamalizadas. Se encontró que en el caso del maíz, alrededor del 70 % de la harina fue retenida en la malla 40 en todos los tiempos de cocimiento, con excepción del de 15 min. Esto sugiere que el tamaño de partícula es grueso ($>425 \mu\text{m}$). La norma del Codex Alimentarius CODEX STAN 154-1985 establece que el 95 % o más de la harina integral de maíz deberá pasar por un tamiz de $1,700 \mu\text{m}$, el 45 % o más deberá pasar por un tamiz de $701 \mu\text{m}$ y que el 35 % o menos deberá pasar por un tamiz de $212 \mu\text{m}$, por lo que la harina obtenida se acerca a lo establecido por la norma. Sahai *et al.* (2001) reportaron un porcentaje de retención de alrededor del 0.5 % en la malla 40 en harinas comerciales. Fernández-Muñoz *et al.* (2002), en el proceso de obtención de harina nixtamalizada de maíz, hicieron pasar la harina por una malla U.S 60, es decir que las partículas fueron $<250 \mu\text{m}$. Por lo que comparado con lo obtenido en este estudio, el tamaño de partícula fue grueso en todos los tiempos de cocimiento.

En el garbanzo, el tiempo de cocimiento del grano tuvo un efecto significativo ($P \leq 0.05$) en el porcentaje de retención en los distintos tamices. Se observó un aumento en el porcentaje de retención en la malla 40 conforme aumentó el tiempo de cocimiento con excepción de la harina de garbanzo cocido por 45 min que fue la que tuvo un mayor porcentaje de retención en este tamiz. Sin embargo, esta diferencia se piensa que puede ser principalmente debido a la naturaleza y humedad de la muestra que por el efecto del cocimiento en sí. Esto porque al realizar el análisis se observó aglomeración de harina en el primer tamiz conforme el contenido de humedad de la harina fue en aumento (Tabla 6), lo que una vez más sugirió que se debía aumentar el tiempo de secado para el garbanzo. Finalmente, tomando en consideración que el producto a

elaborar es un pan, se concluyó que se debía reducir el tamaño de partícula de la harina, ya que éste fue grueso para los tres granos.

Tabla 7. Distribución de tamaño de partículas de las harinas nixtamalizadas						
Harina	Tiempo de cocción (min)	No. de Malla				Fondo
		40 (425 µm)	60 (250 µm)	80 (177µm)	100 (140µm)	
Maíz	15	53.51 ^b	34.74 ^a	8.81 ^a	1.83 ^{ac*}	0.72 ^{ac*}
	30	72.46 ^a	26.05 ^a	1.14 ^b	0.10 ^c	0.05 ^c
	45	71.67 ^a	27.41 ^a	0.60 ^b	0.03 ^{bc}	0.00 ^b
	60	70.87 ^a	26.29 ^a	0.46 ^b	0.03 ^{bc}	0.01 ^{bc}
Garbanzo	15	38.44 ^d	58.86 ^a	0.08 ^{b*}	0.04 ^{a*}	0.04 ^{a*}
	30	59.97 ^c	39.0 ^b	0.34 ^a	0.47 ^a	0.01 ^{ab}
	45	81.2 ^a	17.92 ^d	0.20 ^a	0.03 ^a	0.00 ^b
	60	71.28 ^b	27.75 ^c	0.29 ^a	0.03 ^a	0.00 ^b
Trigo		32.96	38.13	26.69	1.24	0.56

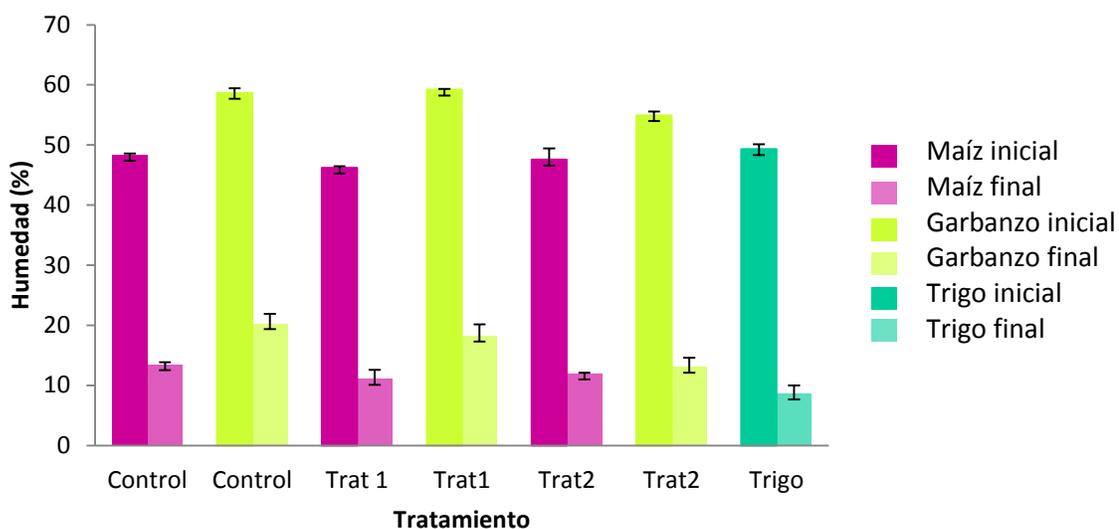
Los datos se expresan como porcentaje de retención en cada malla y representan las media de cuadruplicados. Letras diferentes en columnas del mismo grano por malla indican diferencias significativa ($P \leq 0.05$) *Comparación de medias por prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (valor de $z < 1.96$).

En el trigo, se encontró que el 67 % de la harina pasó por el tamiz de 425 µm y 28.91 % pasó por el tamiz de 250 µm. No existe una norma que regule el tamaño de partícula para harina integral en México. Sin embargo, el CODEX STAN 154-1985 establece para harina de trigo blanca que el 98 % de las partículas de harina deben pasar por el tamiz de 212 µm, mientras que el CODEX STAN 178-1991 establece que para harina integral de trigo duro el 80 % deberá pasar por el tamiz de 315 µm. Por lo que tomando en consideración éstos parámetros, se considera que la harina de trigo obtenida fue gruesa.

6.3 Nixtamalización

La temperatura de ebullición de la solución agua-cal fue de 92.5 ± 0.11 °C en todos los casos. En el tratamiento 1 (choque térmico a ~ 30 °C) la temperatura del agua fue de 28.6°C. Al momento de realizar el choque térmico, se tomó lectura de la variación de la temperatura en el agua y se obtuvo que a los 5 min la temperatura fue de 40.5 ± 0.7 , a los 10 min de 39.2 ± 0.6 y a los 15 min de 38.4 ± 0.4 °C. En el tratamiento 2 (choque a ~ 1 °C), la temperatura del agua que se utilizó para posteriormente incorporar hielo fue de 9.3 ± 0.1 °C y la temperatura del agua con hielo (la que se utilizó para dar el choque) fue de 0.86 ± 0.3 °C. De igual forma se registró el cambio de temperatura durante el choque térmico y se obtuvo que a los 5 min la temperatura fue de 13.7 ± 0.3 °C, a los 10 min de 13.3 ± 0.16 °C y a los 15 min de 13 ± 0.2 °C.

La Figura 8 muestra la humedad inicial y final de los granos de maíz, garbanzo y trigo del secado convectivo. En general para todos los tratamientos, la humedad inicial para maíz fue 47.3 ± 1.1 %, para el garbanzo de 57.6 ± 2.3 % y para trigo 49.3 ± 0.8 %, estos valores son similares a los obtenidos en etapas previas del presente trabajo. Se observó que con los tiempos de secado modificados con base a los resultados previos, el contenido de humedad final promedio de los 3 tratamientos de nixtamalización fue de 12.19 ± 1.241 %, 17.24 ± 3.72 % y 8.67 ± 1.30 % para maíz, garbanzo y trigo respectivamente, lo cual muestra que se logró reducir la humedad final del grano con el fin de posteriormente obtener harinas con una humedad ≤ 14 %. La pérdida de humedad durante el secado convectivo fue mayor en el garbanzo (40 ± 1.82 %) que en el maíz (35.18 ± 0.37 %). Lo anterior puede atribuirse a que el contenido de humedad inicial y tiempo de secado del garbanzo fue mayor. En el caso del trigo, la pérdida de humedad fue de 40.64 %, lo cual puede deberse a que de los granos utilizados, éste es el más pequeño.



El control se refiere a la muestra nixtamalizada de forma tradicional

Figura 8. Humedad del grano al inicio y final del secado convectivo

La Tabla 8 muestra el contenido de humedad de las harinas una vez llevada a cabo la molienda de los granos naturales y con tratamiento de nixtamalización y choque térmico. Todas las harinas con excepción de garbanzo control y con tratamiento 1 estuvieron por debajo del 14 % de humedad, razón por la cual se concluyó que el tiempo de secado para todos los granos (7, 8 y 5.5 h para maíz garbanzo y trigo, respectivamente) fue suficiente.

6.4 Perfil Viscoamilográfico de Harinas Individuales

La Figura 9 muestra el perfil viscoamilográfico (gráficas del RVA) de las harinas de maíz y garbanzo de los cuatro tratamientos (con los tiempos de cocimiento y de secado establecidos previamente).

Tabla 8. Humedad de harinas individuales		
Harina	Tratamiento	Humedad (%)
Maíz	Control	11.25 ± 0.12 ^a
	Trat 1	9.83 ± 0.09 ^c
	Trat2	10.85 ± 0.17 ^b
	Natural	9.90 ± 0.07 ^c
Garbanzo	Control	14.73 ± 0.39 ^b
	Trat 1	15.49 ± 0.47 ^a
	Trat2	12.69 ± 0.85 ^c
	Natural	6.26 ± 0.08 ^d
Trigo	"nixt"	8.04 ± 0.07 ^b
	Natural	9.19 ± 0.05 ^a
Avena	Natural	7.97 ± 0.04

Los valores representan la media ± desviación estándar de triplicados. Letras diferentes en columnas del mismo grano indica diferencia significativa (P≤0.05)

La harina de maíz muestra una tendencia a disminuir la viscosidad con el efecto de los tratamientos con calor. La muestra que presentó mayor viscosidad pico fue la natural (1169 cP), seguida por el tratamiento 1 (1072 cP), tratamiento 2 (983.83 cP) y por último el control (929 cP). Las diferencias entre los valores de las medias resultaron significativas (P≤0.05), siendo diferentes todas las muestras entre sí. Este comportamiento se debe en parte a la interacción de los cationes de calcio con el almidón, ya que se ha sugerido que esta interacción inhibe la gelatinización del almidón (Mondragón *et al.*, 2006). Los valores mayores de viscosidad observados en la harina natural, se deben a que el almidón se encuentra de forma nativa, por lo que hay mayor capacidad de los granos de absorber agua, lixiviar amilosa y consecuentemente aumentar la viscosidad del medio.

La temperatura de empaste fue de 81.7, 84.5, 83.1 y 84.2 °C para la harina de maíz natural, control, tratamiento 1 y tratamiento 2 respectivamente. Estas diferencias resultaron significativas ($P \leq 0.05$) siendo el maíz natural y el maíz con el tratamiento 1 diferentes al maíz control y maíz con tratamiento 2, pero entre estos últimos no hubo diferencia significativa. En general se observó que la temperatura de empaste aumentó con el efecto de la nixtamalización y este comportamiento se debe a que el almidón al ya haber sido procesado térmicamente, muchos de los gránulos fueron total o parcialmente gelatinizados y además en la etapa de reposo, sucede retrogradación (Fernández-Muñoz *et al.*, 2002).

Quintanar-Guzmán *et al.* (2011), encontraron que la temperatura de gelatinización de muestras de maíz nixtamalizado y sin nixtamalizar, aumentó con el efecto del cocimiento en cal y argumentan que este efecto también se podría deber a interacciones de cadenas de almidón con iones de calcio, produciendo cambios estructurales en el almidón entrecruzado. Adicionalmente, interacciones principalmente de almidón-lípidos, almidón-proteína, almidón-calcio y proteína-calcio, le confieren resistencia al fenómeno de la gelatinización (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009).

Al igual que en las gráficas de RVA de maíz nixtamalizado mostradas anteriormente en la sección 6.2, todos los tratamientos mostraron resistencia al estrés mecánico, ya que no hubo disminución marcada de viscosidad durante la parte de mantenimiento (trough). La muestra con mayor viscosidad durante este periodo fue la natural (1,114.6 cP) seguido por el tratamiento 1 que fue estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$), mientras que los valores del control y el tratamiento 2 fueron iguales. La viscosidad final mostró el mismo comportamiento y mismas diferencias significativas que la viscosidad pico. En la Figura 8 se puede observar que la muestra de maíz natural fue la que tuvo un mayor aumento de viscosidad durante la fase de enfriamiento. Como se mencionó anteriormente, debido a que en la harina natural el almidón se encuentra de forma nativa, es de esperarse que exista una mayor lixiviación de amilosa y por tanto mayor

reasociación de estas cadenas en la fase de enfriamiento, lo que finalmente resulta en un mayor aumento de viscosidad.

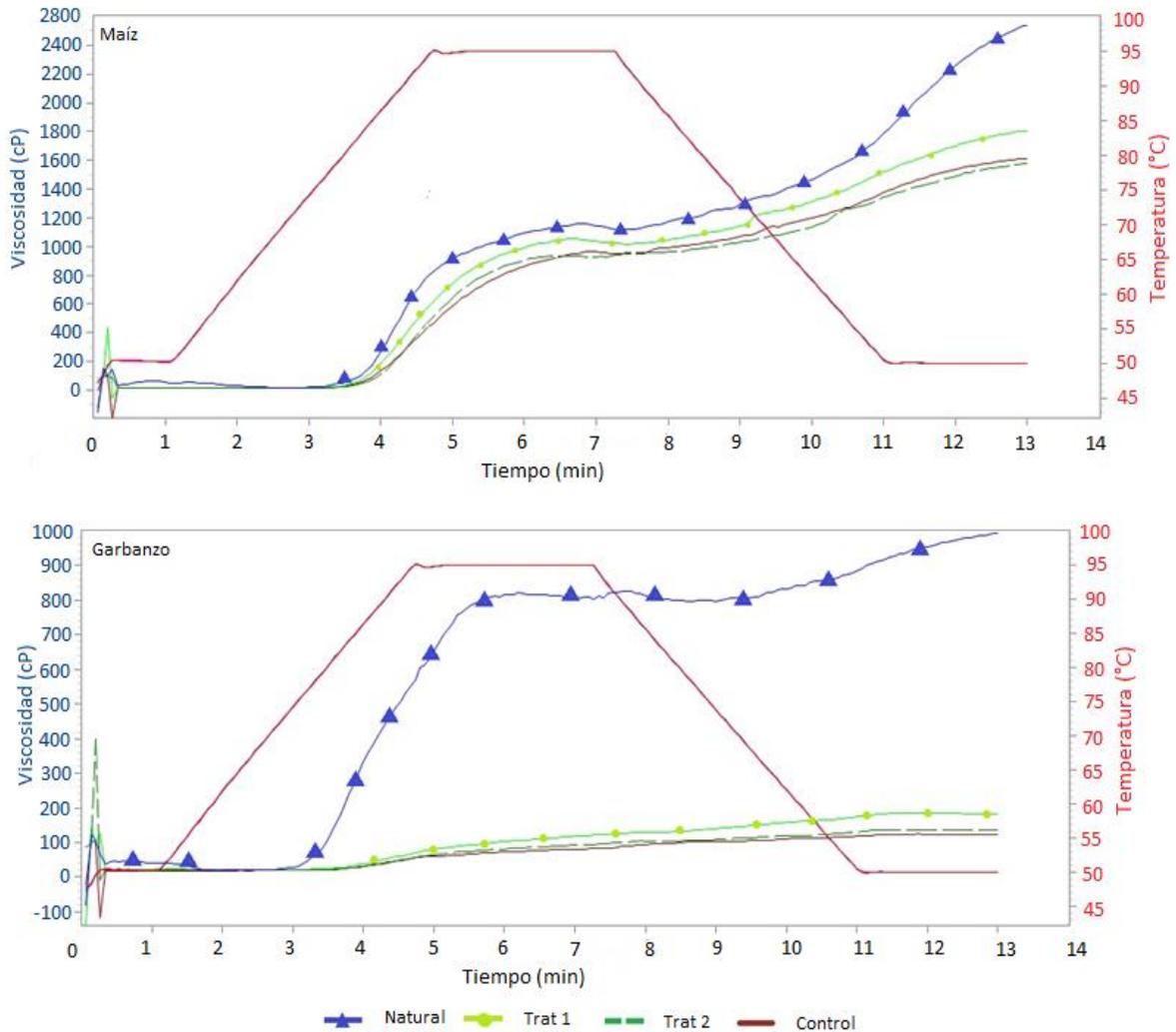


Figura 9. Perfil viscoamilográfico de las harinas de maíz y garbanzo

En cuanto al garbanzo, se observó una diferencia marcada en la viscosidad de la harina natural con las harinas de los otros tratamientos, la cual resultó estadísticamente mayor ($P \leq 0.05$) en todos los parámetros del RVA (Figura 9). En general, los valores de viscosidad pico y final fueron bajos comparados con los del maíz, incluso en la harina natural. Las harinas con tratamiento no mostraron temperatura de empaste, sólo la natural la mostró ($78.56 \pm 0.46^\circ\text{C}$), lo que indica que nunca hubo un cambio de

viscosidad importante durante el calentamiento inicial de las muestras con tratamiento. Comparado con el trigo, maíz y avena, la temperatura de empaste del garbanzo fue menor y esto se puede deber a la menor cantidad de almidón presente en este grano (32-46 %) (Hughes *et al.*, 2009; Oomah *et al.*, 2011). En general, las harinas con tratamiento mostraron pocos cambios de viscosidad a lo largo de la prueba. Gómez *et al.* (2008), reportaron valores de 987 cP de viscosidad pico, 68 cP de breakdown, 275 cP de setback y 1194 cP de viscosidad final en harina de garbanzo natural, lo cual muestra un comportamiento similar al de este estudio en el perfil viscoamilográfico de harina entera de garbanzo. Por otra parte Chung *et al.* (2008), encontraron que el garbanzo tiene menor capacidad de lixiviar amilosa en comparación con otras leguminosas, y reportan valores para el cultivar Desi de 755, 320 y 1068 cP para viscosidad pico, setback y viscosidad final, respectivamente. Estos resultados son cercanos a los encontrados en este trabajo: 832.6, 223.6 y 1006.3 cP de viscosidad pico, setback y viscosidad final, respectivamente.

Durante la fase de enfriamiento, normalmente la viscosidad tiende a aumentar, pero en el caso del garbanzo natural, ésta aumenta solo un poco (setback= 223.6 cP, final viscosity =1006.3 cP). Valores bajos en setback se relacionan con una menor cantidad de gránulos fragmentados (ocasionado por baja capacidad de hinchamiento del grano) en la matriz de amilosa lixiviada (Chung *et al.*, 2008). Estos resultados podrían explicarse por el hecho de que el garbanzo (como todas las leguminosas) contiene menor almidón que los cereales. Tomando en cuenta los valores bajos de setback en el garbanzo, podría esperarse que la sustitución de esta harina en trigo pudiera resultar en migas más suaves (Gómez *et al.*, 2008). Sin embargo una viscosidad baja en el perfil de RVA puede reducir la habilidad de desarrollo de la masa (Rachwat *et al.*, 2013).

La línea de las gráficas de viscosidad de garbanzo muestran irregularidades lo cual puede deberse a la interacción del almidón con otros componentes, ya que el garbanzo tiene un alto contenido de proteína y de lípidos y ha sido reportado que estos componentes interactúan con el almidón; y estas interacciones afectan las propiedades

viscoamilográficas de las harinas. Becker *et al.* (2001), sugieren que la formación de complejos de amilosa-lípidos reducen el hinchamiento del gránulo y la solubilización del almidón, por lo que esto podría explicar los cambios en los perfiles viscoamilográficos de las muestras de harinas de garbanzo obtenidas en el RVA.

Por otro lado, Singh *et al.* (2004), evaluaron el perfil viscoamilográfico de almidones aislados de diferentes cultivares de garbanzo y reportaron valores de 75.4-76.7 °C para temperatura de empaste, 1,107-2,173 cP de viscosidad pico, 532-1123 de setback y 1,639-3,250 cP de viscosidad final. Así mismo, Miao *et al.* (2009), al analizar el almidón de dos variedades de garbanzo (Desi y Kabuli) reportaron valores de 1,989-2823 cP, 3,117-3171 cP y 3,375-4,686 cP para viscosidad pico, setback y viscosidad final. Estos autores encontraron diferencias significativas en los parámetros del RVA entre las variedades Desi y Kabuli. Estos valores obtenidos con almidón libre de proteína y grasa resultan muy diferentes a lo encontrado en este trabajo, en donde se utilizó harina de garbanzo entero y no sólo almidón, por tanto sugieren, tal y como lo habían mencionado Becker *et al.* (2001), que la presencia de proteína y lípidos disminuyen la viscosidad en el perfil viscoamilográfico. Hughes *et al.* (2009), demostraron que a menor formación de los complejos almidón-lípidos la viscosidad aumenta, lo que explicaría la diferencia entre lo encontrado en este trabajo y lo reportado por otros autores.

Al inicio de la prueba, antes de la fase de calentamiento, se observa que existe una viscosidad inicial (viscosidad en frío). Sin embargo, esto sólo es visible en las muestras con tratamiento de nixtamalización, siendo un poco más marcado para la harina de garbanzo control. Este pico de viscosidad inicial es característico de almidones pre-gelatinizados o gelatinizados, mientras que el pico posterior es característico de los almidones nativos, que en el caso de las harinas con tratamiento no es marcado. Así mismo, el característico aumento de viscosidad al final de la prueba, no se observa en

las gráficas de las harinas de garbanzo, lo que sugiere que no se presenta retrogradación del almidón en esta última etapa.

La Figura 10 muestra el comportamiento de las propiedades viscoamilográficas de las harinas de trigo y avena. La avena mostró los valores más altos de viscosidad en todos los parámetros, resaltando la viscosidad final y viscosidad pico, que son significativamente mayores ($P \leq 0.05$) al compararla con las harinas de maíz, trigo y garbanzo de todos los tratamientos. Esta viscosidad se debe principalmente a que la avena tiene un alto contenido de fibra soluble como los β -glucanos, los cuales tienen alta capacidad de absorción de agua. Otros autores han reportado perfiles viscoamilográficos de avena muy similares (Angioloni *et al.*, 2013). Por tanto, puede considerarse que la incorporación de avena en un sistema multigrano que contiene harinas de fuentes distintas al trigo, las cuales tienden a disminuir la viscosidad, contrarreste este efecto y resulte en un una masa manejable y finalmente un producto de calidad aceptable.

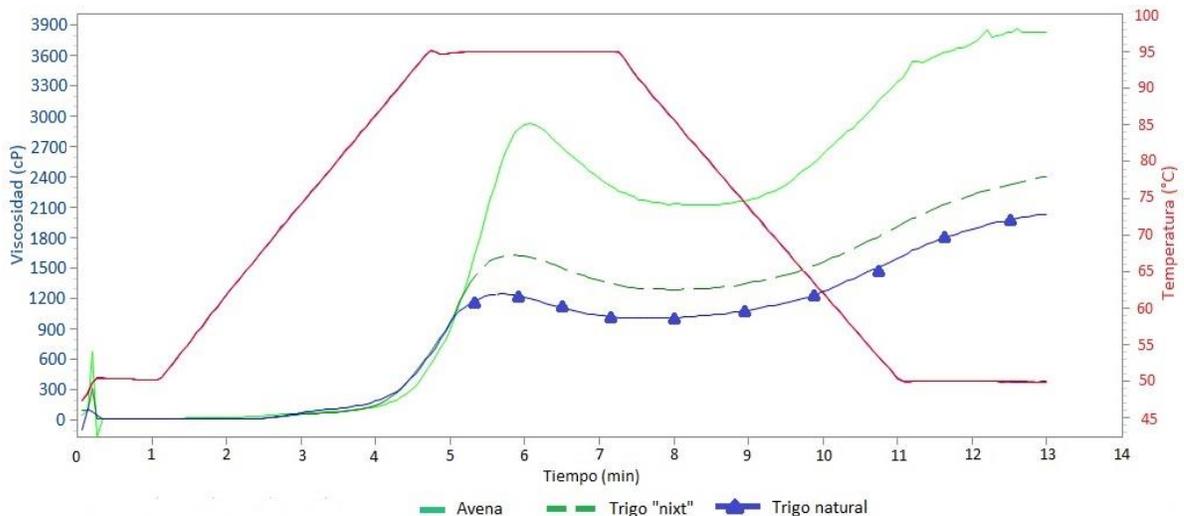


Figura 10. Perfil viscoamilográfico de harinas de trigo y harina de avena

El mantenimiento del grano por debajo de la temperatura de gelatinización en exceso de agua es conocido como "annealing", en este fenómeno lo que sucede es que el

gránulo se hincha (reversiblemente) permitiendo la movilidad de los dominios cristalinos. Esto resulta en una re-organización de las moléculas de amilopectina, alineándose una con la otra y formando hélices entre amilosa y amilopectina y/o amilosa (Jayakody *et al.*, 2008). En diversos estudios se ha reportado que someter a los granos de cereales a este tratamiento tiende a disminuir los valores de viscosidad del RVA cuando se compara con su contraparte nativa ya que es bien conocido que el almidón nativo desarrolla mayor viscosidad que el gelatinizado. Además, se aumenta la temperatura de gelatinización, lo cual se ve reflejado en la temperatura de empaste en el análisis de perfil viscoamilográfico (Tester *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2014).

En el perfil viscoamilográfico del trigo, contrario a lo esperado, la harina “nixtamalizada” resultó en valores significativamente mayores ($P \leq 0.05$) de viscosidad en todos los parámetros, con excepción de la temperatura de empaste y el tiempo de pico, que la harina de trigo natural. Es decir el efecto de la “nixtamalización” en el trigo no modificó la temperatura a la cual los gránulos de almidón se hinchan y comienzan a liberar amilosa por lo que la viscosidad del medio cambia. Esto indica que bajo las condiciones utilizadas en este estudio para el tratamiento de “nixtamalización” de trigo, probablemente no hubo gelatinización de almidón como era de esperarse, a pesar de que la temperatura de reposo estuvo alrededor de la temperatura de gelatinización (52-85°C) para el trigo (BeMiller, 2007).

Esta inconsistencia tal vez se pueda deber a que la temperatura a la que se reposó el grano no fue constante, es decir el grano se dejó reposar a una temperatura inicial de 62 °C pero esta temperatura fue disminuyendo en el transcurso de las 20 h de reposo hasta alcanzar el equilibrio con la temperatura ambiente. Por lo que probablemente la temperatura no penetró lo suficiente o bien por el periodo suficiente para ocasionar gelatinización de almidón y observar estos cambios en el perfil viscoamilográfico. Sin embargo, de ser este el caso, esto no explica la mayor viscosidad de la harina “nixtamalizada”, ya que la viscosidad de esta harina se mostraría muy similar a la de la

harina de trigo natural y en los resultados de este estudio no solo las harinas no se comportan igual, si no que la “nixtamalizada” mostró mayor viscosidad. Un comportamiento similar fue reportado en grano de maíz por Robles *et al.* (1998) en donde la cocción alcalina y el remojo de maíz en agua indujo aumentos significativos en la viscosidad medida con un viscoamilógrafo Brabender.

En el maíz el efecto de la absorción de cal ha sido ampliamente estudiado, sin embargo se desconoce este efecto en el grano de trigo. En harina de maíz nixtamalizada, se ha encontrado que la viscosidad aumenta conforme disminuye el tamaño de partícula (Gomez *et al.*, 1991b), por lo que tal vez el tratamiento que se le dio al trigo afectó su desempeño en la molienda y consecuentemente el perfil viscoamilográfico. Cabe resaltar, que en proceso de “nixtamalización” del trigo, el grano se sometió a secado convectivo a 50 °C lo que también pudo haber ocasionado algún cambio en la organización de las moléculas de amilosa y amilopectina. Por lo tanto, todo este proceso evidentemente ocasionó cambios en la estructura del almidón y su comportamiento en el perfil viscoamilográfico por lo que se obtuvieron los resultados mostrados.

6.5 Almidón Resistente de Harinas Individuales

La Tabla 9 muestra los resultados del contenido de almidón resistente en las harinas de maíz, garbanzo, trigo y avena obtenidas individualmente. Para el maíz, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los valores de los distintos tratamientos. Se encontró que los valores del tratamiento de nixtamalización tradicional (maíz control) y el maíz natural (sin ningún tratamiento) fueron estadísticamente iguales, así como los valores del maíz con tratamiento 1 y tratamiento 2. Sin embargo, ambos tratamientos con choque térmico resultaron estadísticamente diferentes a los de maíz control y maíz natural. Esto indica que la nixtamalización por sí sola no representó un cambio

significativo en el RS y que la variación brusca de temperatura (ya sea temperatura ambiente o fría) después de la nixtamalización, tiene el efecto de aumentar el contenido de almidón resistente.

Lo anterior se le atribuye a la retrogradación de la amilosa, la cual ocurre cuando se somete el grano a calor en exceso de agua, lo cual va ocasionando una disrupción de la organización compacta del almidón liberándose moléculas lineales de amilosa. Cuando el sistema se va enfriando, estas moléculas se realinean en hélices alfa y posteriormente las hélices se asocian entre sí por puentes de hidrógeno ocasionando una recristalización. Al someter un grano a cambios de temperatura, este proceso se podría dar en repetidas ocasiones por lo que podría resultar en un mayor contenido de almidón resistente (Perera *et al.*, 2010), como fue en esta investigación.

Tabla 9. Almidón resistente de harinas individuales	
Muestra	g/100g (b.s)
Maíz natural	1.75 ± 0.05 ^b
Maíz control	1.80 ± 0.09 ^b
Maíz Trat 1	3.14 ± 0.09 ^a
Maíz Trat 2	2.82 ± 0.62 ^a
Garbanzo natural	0.76 ± 0.04 ^c
Garbanzo control	3.79 ± 0.00 ^b
Garbanzo Trat 1	4.01 ± 0.10 ^{ba}
Garbanzo Trat 2	4.15 ± 0.08 ^a
Trigo natural	0.45 ± 0.00 ^a
Trigo "nixt"	0.46 ± 1.35 ^a
Avena	2.01 ± 0.05

b.s =base seca, Trat 1=Tratamiento 1, Trat 2= Tratamiento 2. Los valores representan la media ± desviación estándar de duplicados. Letras diferentes entre tratamientos por grano indica diferencia significativa (P≤0.05).

El tratamiento con choque térmico a temperatura ambiente (Trat 1) mostró el valor más alto de RS en maíz, y si bien no fue estadísticamente mayor que el tratamiento 2, esto podría mostrar que para el maíz un cambio de temperatura no tan severo favorece la retrogradación. Sotelo *et al.* (2008), encontraron valores por debajo de lo expuesto en este trabajo, 0.43 g/100 g para maíz natural y 0.61 g/100 g para maíz nixtamalizado, mientras que Granfeldt *et al.* (1995), reportaron 3 g/100g de RS en harina de maíz común. Esta diferencia se puede deber al método de análisis utilizado que fue distinto, a las variaciones en el proceso de nixtamalización y a la variedad de maíz utilizado.

Se encontró diferencia significativa entre los tratamientos del garbanzo ($P \leq 0.05$), el tratamiento control fue estadísticamente igual al tratamiento 1, lo que indica que el choque térmico a temperatura ambiente no tuvo un efecto significativo en el contenido de almidón resistente. Sin embargo, el tratamiento 2 fue significativamente mayor al control y si bien no lo fue con respecto al tratamiento 1, esto nos indica que contrario a lo que se encontró en el maíz, el choque térmico con agua fría tuvo mayor efecto en el garbanzo.

Sotelo *et al.* (2008), reportaron valores de 0.60 g/100 g de RS en garbanzo crudo y 2.64 g/100 g en garbanzo cocido. En el presente trabajo se obtuvo un valor cercano en el garbanzo natural, pero en el garbanzo nixtamalizado se obtuvieron valores más altos, lo cual probablemente se deba al procesamiento diferente. Otros autores reportan valores de 4.17 o incluso hasta 24.1 a 40.57 g/100 g. Sin embargo estas variaciones se deben al método de análisis utilizado donde varía el tiempo de digestión (que es más corto), reactivos, temperaturas y tiempo de incubación, entre otras diferencias (Bravo *et al.*, 1999; Hughes *et al.*, 2009).

En el caso del trigo, no se encontró diferencia significativa en el contenido de RS del trigo natural y trigo "nixtamalizado". Sotelo *et al.* (2008), reportaron valores de 0.33

g/100 g en trigo natural, sin embargo, las diferencias se pueden deber a la variedad utilizada y al método de análisis. En cuanto a la avena, los mismos autores reportaron 0.78 g/100 g de RS lo cual está por debajo de lo obtenido en este trabajo. Es importante considerar que la temperatura, humedad y el tiempo de exposición del grano a estos factores siempre resultará en modificaciones en las propiedades del almidón, independientemente de la fuente. Por ejemplo, se ha reportado que la extrusión de harina tiende a aumentar el contenido de almidón resistente y de igual forma los productos horneados o sometidos a vapor y presión (Kim *et al.*, 2006; Liljeberg *et al.*, 1996).

6.6 Perfil Viscoamilográfico de Harinas Multigrano

Una vez determinado el RS se procedió a realizar las formulaciones multigrano de acuerdo a las proporciones ya descritas (Tabla 3), finalmente se seleccionó el maíz con tratamiento 1 y el garbanzo con tratamiento 2 para realizar las mezclas. La Figura 11a muestra las gráficas de perfil viscoamilográfico de las tres formulaciones multigrano natural. Se encontró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en todos los parámetros del RVA, a excepción de la temperatura de empaste y el tiempo pico. Considerando que todos los granos fueron molidos bajo las mismas condiciones, este resultado es congruente, ya que la temperatura de empaste se relaciona con el daño al almidón, el cual se da principalmente en la molienda del grano. En todos los demás parámetros la formulación 1 resultó estadísticamente igual a la formulación 3 y la formulación 2 diferente a formulación 1 y 3; con excepción del breakdown en donde todas las formulaciones resultaron diferentes entre sí.

Con esta comparación se observa el efecto que tienen los cambios en la formulación en las propiedades viscoamilográficas de la harina multigrano. El hecho de que la formulación 2 resultó diferente a la 1 y 3, se debe a que la formulación 2 contiene

mayor proporción de garbanzo. De acuerdo a los perfiles viscoamilográficos del garbanzo ya presentados, éste tiene muy poca viscosidad por lo que la presencia de garbanzo en un sistema combinado tiende a disminuir la viscosidad conforme éste se aumenta. Este efecto se puede contrarrestar con la incorporación de avena (como se había sugerido anteriormente), lo cual se puede observar en la formulación 3, en la cual a pesar de tener más garbanzo que la 1 también contiene más avena, por lo que no hubo diferencia significativa en los perfiles viscoamilográficos. En comparación con los valores del trigo “nixtamalizado”, la formulación que más se asemeja es la formulación 1, sin embargo es la que contiene menor contenido de garbanzo, que es el grano que se espera ayude a disminuir el IG de pan, por lo que es deseable que su proporción en la formulación sea mayor.

En la Figura 11b se muestran los perfiles viscoamilográficos de las formulaciones multigrano con tratamiento (trigo “nixt”, maíz trat 1 y garbanzo trat 2). Al igual que en las naturales, se encontró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en todos los parámetros a excepción de la temperatura de empaste y de tiempo de pico. Todos los demás parámetros (viscosidad pico, trough, breakdown, viscosidad final y setback) de las 3 formulaciones resultaron diferentes entre sí y en todos los casos los valores más altos los obtuvo la formulación 1 (1342.67, 1101, 256.67, 2196.67 y 1095.67 cP, respectivamente).

Ragae *et al.* (2006), evaluaron el perfil viscoamilográficos de panes elaborados en relación 85:15 de harina de trigo refinada con cebada, mijo, centeno o sorgo, reportando valores de 86.0-86.9 °C, 1363-1596 cP, 512-738 cP, 1404-1941 cP y 892-1203 cP para temperatura de empaste, viscosidad pico, trough, viscosidad final y viscosidad de setback, respectivamente. Al comparar estos valores con los de harina de trigo refinada, los autores reportan una disminución de viscosidad en todos los parámetros del RVA. Un comportamiento similar al obtenido por estos autores también se observó en el presente estudio al comparar la harina de trigo natural con la harina

multigrano natural y la harina de trigo nixtamalizada con la harina multigrano con tratamiento.

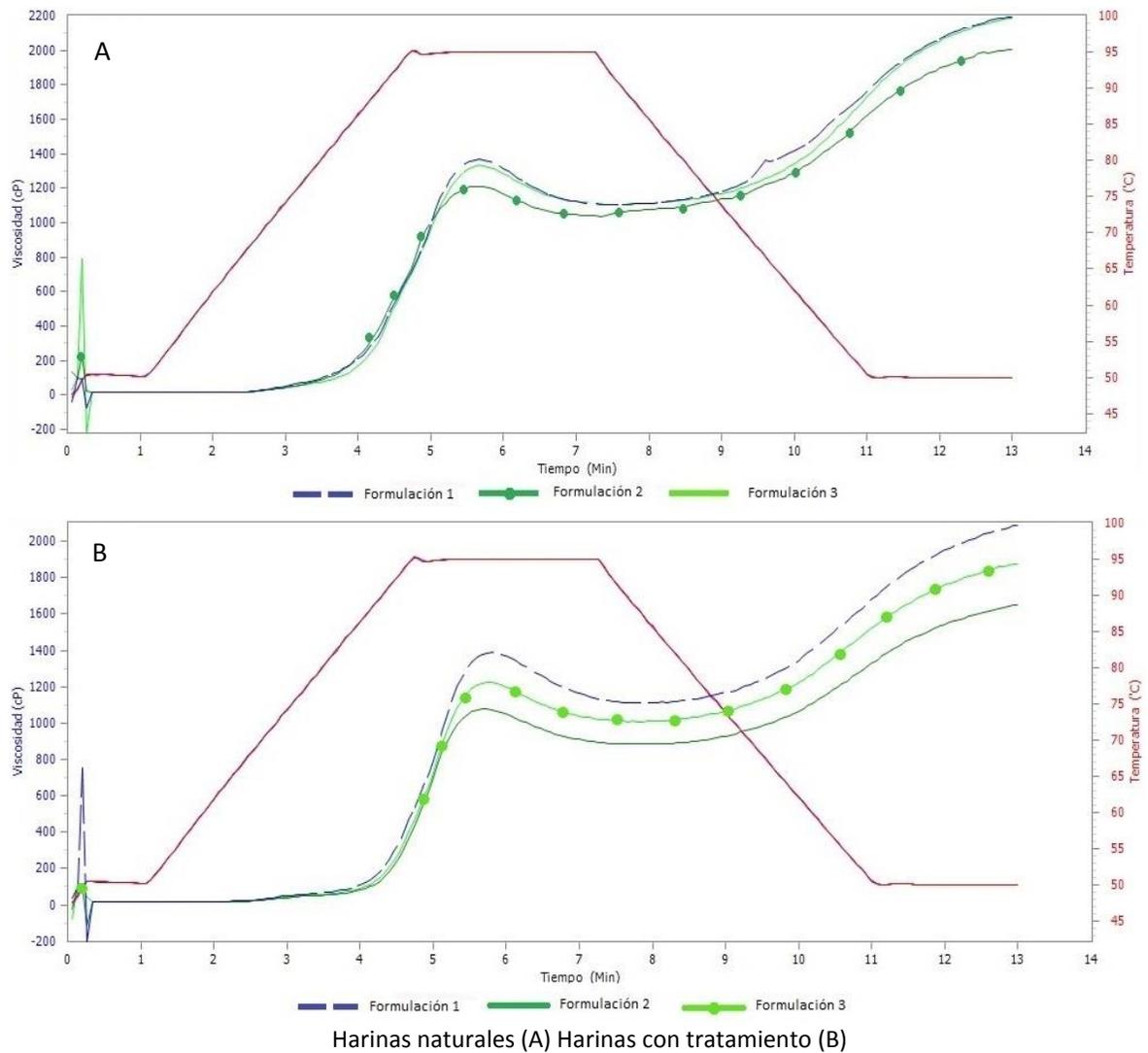


Figura 11. Perfil viscoamilográfico de formulaciones multigrano naturales y con tratamiento.

Adicionalmente, se realizaron análisis de varianza a los parámetros del RVA por cada formulación buscando diferencia entre la formulación natural y con tratamiento. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las 3 formulaciones en todos los parámetros con excepción del trough en la formulación 1, breakdown en la formulación 2 y 3 y tiempo pico en la formulación 3 que resultaron estadísticamente iguales

($P \geq 0.05$). En todas las formulaciones la temperatura de empaste aumentó, el cual fue un comportamiento que ya se había observado en el análisis de las harinas individuales. En el resto de los parámetros los valores de viscosidad disminuyeron en la harina con tratamiento, lo cual también se había observado anteriormente en las harinas individuales. Esto indica que la incorporación de harinas nixtamalizadas en una formulación multigrano resulta en modificaciones significativas en el comportamiento del almidón y probablemente en el producto final.

Estos resultados indican que posiblemente la formulación 1 tanto natural como con tratamiento es la que podría dar mejor resultados, ya que es la que tiene los valores más altos de viscosidad. La viscosidad del batido durante la elaboración de un pan puede facilitar el desarrollo de una miga cohesiva que atrapa las burbujas de gas y previene la pérdida de dióxido de carbono que ocasiona que la corteza colapse (Bakare *et al.*, 2013). Aunque otros parámetros del RVA se han asociado con la calidad del producto final, la prueba de panificación es la que finalmente dicta qué formulación es mejor (Gómez *et al.*, 2008; Ragae *et al.*, 2006).

6.7 Panificación de Formulaciones Multigrano

La Tabla 10 muestra los valores obtenidos de volumen específico de las diferentes formulaciones multigrano. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en los panes multigrano naturales y entre los tres panes con tratamiento. En los panes naturales, el pan formulación 1 resultó con el mayor volumen específico ($2.84 \text{ cm}^3/\text{g}$), pero fue estadísticamente igual al pan formulación 2. Otros autores han reportado valores similares para panes de harinas compuestas, por ejemplo Angioloni *et al.* (2013), reportan $2.8 \text{ cm}^3/\text{g}$ para pan con 60 % de sustitución con harina de avena más 7 % de gluten; Gularte *et al.* (2012) reportan $2.7 \text{ cm}^3/\text{g}$ en pan con 50 % de garbanzo y el resto de harina de arroz. Considerando que la diferencia en estos panes es que el pan F1 contiene 10 % más trigo y 10 % menos de garbanzo, se esperaba que el volumen

específico disminuyera, ya que se ha reportado que la incorporación de leguminosas tiende a disminuirlo (Angioloni *et al.*, 2012b; Gómez *et al.*, 2008).

Sin embargo, también en esos mismos estudios y en otros se han reportado panes con buena aceptabilidad y valores de hasta 3.6 cm³/g de volumen específico al incorporar leguminosas pero con el uso de aditivos que mejoran el volumen (Miñarro *et al.*, 2012; Mohammed *et al.*, 2012). Estos resultados indican que en este sistema multigrano, el incremento del contenido de garbanzo no afectó significativamente el volumen específico del pan. Por tanto, considerando que el objetivo del estudio es reducir el índice glucémico del pan, el pan formulación 2 es el que más se podría aproximar a ello sin comprometer en gran medida la calidad del pan.

Tabla 10. Volumen específico de panes multigrano		
	Formulación	Volumen específico (cm³/g)
Natural	Control comercial*	2.48 ± 0.00 ^b
	F1	2.86 ± 0.04 ^a
	F2	2.83 ± 0.03 ^a
	F3	2.64 ± 0.06 ^b
Con Tratamiento	Control comercial*	2.43 ± 0.01 ^a
	F1	2.52 ± 0.02 ^a
	F2	2.11 ± 0.07 ^b
	F3	2.03 ± 0.03 ^b

Los valores representan las medias de duplicados ± desviación estándar. Letras diferentes en la columna de panes naturales o con tratamiento indica diferencia significativa (P≤0.05).

* Pan elaborado con harina integral disponible comercialmente

En cuanto a los panes multigrano con tratamiento, el valor más alto de volumen específico correspondió al pan formulación 1 (2.52 cm³/g), que resultó estadísticamente igual al control y diferente al pan de las otras dos formulaciones. Por otro lado, el valor más bajo lo obtuvo el pan formulación 3 (2.03 cm³/g) que resultó

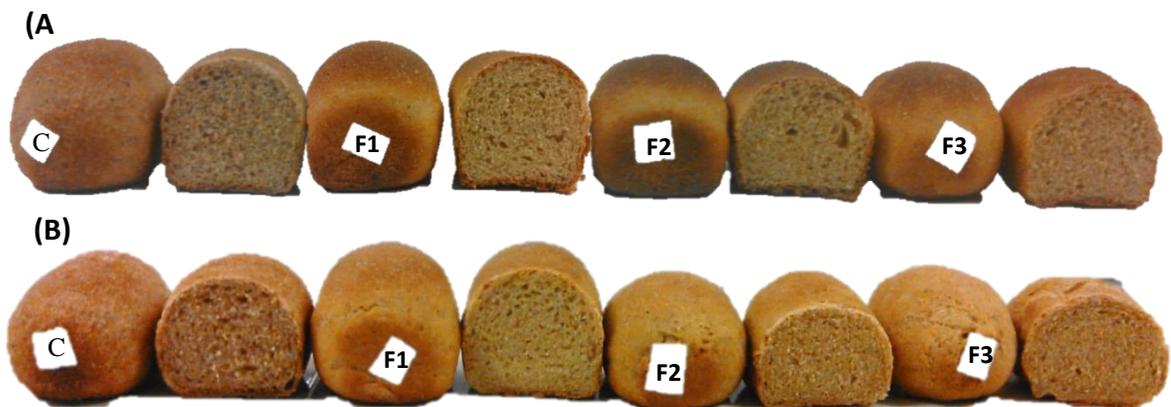
estadísticamente igual al pan formulación 2. Además, se encontró una disminución significativa ($P \leq 0.05$) del volumen específico entre el pan formulación 1 con tratamiento que el pan formulación 1 natural y se observó el mismo comportamiento con las otras dos formulaciones. De esta forma se demuestra que el tratamiento de nixtamalización que se le aplicó a los granos y que resultó en diferencias significativas en los perfiles de RVA, finalmente también ocasionó cambios en el producto final.

La disminución del volumen específico es común en panes integrales y multigrano, ya que el gluten de trigo es único en las características de viscoelasticidad que son ideales para obtener un pan esponjoso y suave. La adición de otras fuentes proteicas, fibra dietaria y harinas de otros cereales u otras fuentes ocasiona una disrupción de la matriz gluten-almidón, ya que básicamente “diluyen” el gluten. Esto ocasiona menor viscoelasticidad, las propiedades de la masa cambian y durante la fermentación existe menor capacidad de retención de gas, lo cual finalmente resultará en un menor volumen de pan (Fenn *et al.*, 2010).

En la Figura 12 se muestra la apariencia del interior y exterior de los panes obtenidos, en general, el color de los panes multigrano fue un poco más amarillento que el control tanto en los panes naturales como en los panes con tratamiento. A simple vista fue apenas perceptible el color un poco más amarillo de los panes multigrano con tratamiento. Este cambio de color, también se observó al obtener las harinas individuales (principalmente de garbanzo), por tanto era de esperarse que existiera algún cambio de color en los panes con tratamiento. El color amarillento en los panes ha sido también reportado por otros autores que han realizado mezclas de leguminosas con trigo (Miñarro *et al.*, 2012).

La corteza fue más delgada y suave en los panes multigrano tanto naturales como con tratamiento que en el control, aunque se observó un mayor oscurecimiento de ésta en la parte posterior en todos los panes multigrano, lo que podría sugerir que tal vez

exista mayor reacción de Maillard por interacciones azúcares-proteína, y tal vez el tiempo de horneado para estos panes es menor que lo establecido por la técnica. La miga de los panes naturales y con tratamiento, fue suave y bastante homogénea lo cual es bueno considerando que es un pan multigrano. Sin embargo también fue compacta, en mayor medida en los panes con tratamiento que en los naturales. Angioloni *et al.* (2012b), reportaron una menor homogeneidad en panes elaborados con 20 % de harina de garbanzo y el resto de trigo, lo cual indica que la incorporación de diversas harinas ayudó a mejorar la homogeneidad de la miga.



Panes elaborados con harinas naturales (A) y panes elaborados con harinas con tratamiento (B)

C= control, F1= formulación 1, F2= formulación 2, F3= formulación 3

Figura 12. Panes de formulaciones multigrano

Si bien los panes obtenidos no resultaron con un volumen específico alto, los valores obtenidos no están muy por debajo de lo reportado por otros autores, considerando que el nivel de sustitución de trigo es alto (30 %). Tomando en cuenta todo lo anteriormente descrito y aunado al objetivo del trabajo, se optó por seleccionar el pan formulación 2. Si bien no es el pan con mayor volumen específico, es la formulación que mayor contenido de garbanzo contiene y por tanto se esperaba que el IG fuera menor.

La composición proximal de los panes multigrano de la formulación seleccionada se muestra en la Tabla 11. El contenido de proteína fue 15.4 y 14.7 % en el pan natural y en el pan con tratamiento, respectivamente. Esta variabilidad de un poco menos de 1 % puede ser debido a la solubilización de proteínas durante el cocimiento de los grano de maíz y de garbanzo. Aunque el garbanzo sólo represente el 19 % de la formulación, fue el grano que mayor tiempo de cocimiento tuvo y el grano con mayor contenido de proteína. El contenido de grasa varió 0.74 % entre el pan natural y el pan con tratamiento; sin embargo fue mayor en el pan natural, lo cual puede deberse a que durante el lavado del grano nixtamalizado de maíz gran parte del pericarpio y germen, que es rico en lípidos, se pierde. En el garbanzo también hay pérdida de pericarpio y además pudiera existir lixiviación de lípidos durante el cocimiento.

Tabla 11. Composición proximal de panes multigrano			
(%)	Pan Blanco	Natural	Con tratamiento
Humedad	28.9 ± 0.08	31.46 ± 0.04	38.36 ± 0.03
Proteína	9.28 ± 0.6	15.46 ± 0.21	14.74 ± 0.29
Grasa	2.54 ± 0.02	4.05 ± 0.27	3.31 ± 0.42
Ceniza	1.2 ± 0.01	2.23 ± 0.01	2.52 ± 0.28

Los valores representan las medias ± desviación estándar de triplicados

La ceniza fue mayor en el pan con tratamiento que en el pan natural, esto probablemente se deba a que en el pan con tratamiento los granos de maíz y garbanzo fueron cocidos y reposados en agua y cal, y en caso del trigo sólo reposado. Por lo tanto, hubo absorción de cal hacia el interior de los granos de maíz, garbanzo y trigo lo que incrementó el contenido de este mineral y finalmente se reflejó en el producto final (Cornejo-Villegas *et al.*, 2013; Fernández-Muñoz *et al.*, 2004). Angioloni *et al.* (2012b), reportaron 46.5% de humedad, 11.58 % de proteína, 1.28 % de grasa y 0.80 % de ceniza en pan con 20 % de garbanzo, 20 % de chícharo, 2 % de soya, 5 % de carboximetilcelulosa y 5 % de gluten. Los resultados de proteína, grasa y ceniza

obtenidos de los panes elaborados en este estudio fueron mayores a los reportados por los autores anteriormente mencionados a pesar de tener un menor contenido de leguminosas.

Se ha reportado que las mezclas multigrano mejoran la calidad nutricional de los productos elaborados a partir de ellas. Generalmente, se observa un aumento en el contenido de proteína y grasa, fibra dietaria y minerales en comparación con los productos elaborados con harina refinada. Comparado con el pan blanco, la proteína aumentó un 83.3 y 79.41 %, la grasa 79.72 y 65.15 % y la ceniza 94.16 y 105 % en el pan multigrano natural y con tratamiento, respectivamente. Gularte *et al.* (2012), reportaron un aumento de 75 %, 55.42 % y 64.7 % de proteína, grasa y ceniza, respectivamente, en pasteles de arroz y garbanzo en relación 50:50, comparado con un control de 100% harina de arroz. Por tanto, los resultados obtenidos en este estudio muestran que la incorporación de harina de garbanzo, avena y maíz, mejoraron la composición química de los panes multigrano elaborados con ellas comparado con el pan convencional, por lo que su consumo es recomendable.

6.8 Almidón Resistente en los Panes Multigrano

El contenido de almidón resistente de los panes multigrano se muestra en la Tabla 12. El valor más alto de RS correspondió al pan F2 con tratamiento. El pan con tratamiento presentó un contenido de RS significativamente mayor ($P \leq 0.05$) que el natural, esto debido a que en etapa previa se seleccionaron las harinas de mayor contenido de RS y fueron las utilizadas para elaborar este pan. Consecuentemente, el pan multigrano elaborado con estas harinas resultó en mayor contenido de almidón resistente. Esto indica que la incorporación de las harinas con tratamiento de nixtamalización con choque térmico a temperatura ambiente para maíz y con agua fría para garbanzo en

una formulación multigrano, tuvieron un efecto en aumentar el contenido de RS del pan multigrano.

Utrilla-Coello *et al.* (2007), reportaron 0.66 % de RS en pan blanco, lo cual es cercano a lo encontrado en este trabajo (0.85 %). También reportaron 2.58 % para pan con 40 % de garbanzo y 3.22 % para pan con 60 % de garbanzo, sin embargo el método utilizado para determinar el RS no fue exactamente igual al de este trabajo. Bravo *et al.* (1999), reportaron 0.12 % en pan blanco y 1.89 % en pan integral. Liljeberg *et al.* (1996), reportaron 3 % de RS en pan de centeno integral con trigo refinado en relación 70:30, sin embargo el método de panificación fue distinto.

Tabla 12. Almidón resistente de pan multigrano	
Pan	RS (g/100g)
Blanco	0.85 ± 0.00 ^a
Natural	1.65 ± 0.04 ^b
Con tratamiento	1.80 ± 0.06 ^c

Los valores representan las medias de duplicados ± desviación estándar

En el mismo estudio de Liljeberg *et al.* (1996), reportaron que menor temperatura de horneado por un periodo más largo y la adición de ácido láctico elevan significativamente al contenido de RS en los panes. También el uso de genotipos waxy (altos en amilopectina) o genotipos altos en amilosa afectan significativamente el contenido de RS, ya que los altos en amilosa lo elevan. Åkerberg *et al.* (1998) reportaron un aumento de 17.5 veces más almidón resistente en panes de centeno integral altos en amilosa con trigo refinado en relación 70:30, comparado con el pan blanco convencional. Así mismo, encontraron que el horneado a menor temperatura por periodos más largos aumentó 51.5 veces más el RS comparado con el pan blanco, por lo que tanto el uso de variedades waxy como las condiciones de procesamiento, afectan el contenido de RS.

6.9 Estimación de Índice Glucémico *in vitro*

La Tabla 13 muestra los valores de índice de hidrólisis (HI) y de índice glucémico estimado (IG) de los panes multigrano. El índice de hidrólisis obtenido fue de 74.76 y 81.38 % para el pan natural y con tratamiento respectivamente, los cuales resultaron estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). El índice glucémico estimado para pan natural y el pan con tratamiento fue de 80.8 y 84.38 % respectivamente, y se encontró diferencia significativa entre los tres panes. En la Figura 13, se muestra la gráfica de almidón total hidrolizado y no es perceptible mucha diferencia entre la curva del pan natural y la del pan con tratamiento, sin embargo, ambos panes multigrano se encuentran por debajo de la curva del pan blanco. Finalmente, el contenido de RS que había resultado significativamente mayor en el pan con tratamiento, no se tradujo en una disminución en el IG; sin embargo, esto también se ha reportado en otros estudios y podría explicarse por diversos factores.

Por ejemplo, Angioloni *et al.* (2012b) evaluaron el contenido de RS y la digestibilidad *in vitro* de panes de harina de trigo refinada con leguminosas y aditivos (20 % garbanzo, 20 % chícharo, 2 % frijol de soya, 5 % carboximetilcelulosa y 5 % gluten) y reportan 77 de HI y 74.57 de IG en el pan. Es decir un 42 % de leguminosas, 10 % aditivos y 48 % de trigo refinado llevó a una disminución de 20 % en el IG comparado con pan blanco. Adicionalmente, el contenido de RS en los panes finalmente no resultó inversamente proporcional al IG, ya que los panes que tuvieron mayor RS no resultaron con menor IG.

Gularte *et al.* (2012), evaluaron la digestibilidad de pasteles libres de gluten a base de harina de arroz con leguminosas (garbanzo, chícharo, lenteja y frijol) en proporción 50:50. Encontraron que el pastel con garbanzo fue el que obtuvo mayor IG (93), mientras que el más bajo lo obtuvo el chícharo (71). La reducción de la biodisponibilidad del almidón de leguminosas se le atribuye a la presencia de

estructuras intactas de tejido/células que rodean a los gránulos de almidón, a un mayor contenido de amilosa y fibra soluble, presencia de antinutrientes, cristales tipo B e interacciones fuertes entre las cadenas de amilosa (Hoover *et al.*, 2003). Sin embargo, en un sistema tan complejo como el pan que contiene una mezcla de ingredientes de distinta naturaleza, y una gran variedad de procesos para elaborar sus múltiples formas, muchos otros factores pudieran estar influenciando el IG. En panes de centeno integral altos en amilosa con trigo refinado (70:30), Åkerberg *et al.* (1998), encontraron una disminución del 29 % en IG *in vitro* comparado con el pan blanco y de 17 % comparado el horneado convencional.

Tabla 13. Índice de hidrólisis y estimación de índice glucémico de panes multigrano

Pan	HI	IG
Blanco	100 ^a	100 ^a
Natural	74.76 ^b	80.8 ^b
Con Tratamiento	81.38 ^c	84.38 ^c

Valores expresados en porcentaje y representan la media de duplicados. Letras diferentes por columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$). HI= Índice de hidrólisis, IG= índice glucémico estimado.

La digestibilidad *in vitro* no solamente se ve afectada por el contenido de RS, sino que existen muchos factores que pudieran afectarla. Por ejemplo, el tamaño del gránulo de almidón, el grado de asociación entre los componentes, cristalinidad, proporción amilosa/amilopectina, complejos amilosa-lípidos, distribución física del almidón en relación con los componentes de fibra dietaria, antinutrientes, inhibidores de alfa amilasa, entre otros (Hoover *et al.*, 2003; Sandhu *et al.*, 2008). También se debe considerar que el pan natural está elaborado a partir de las harinas de los granos sin ningún tratamiento, lo cual significa que los gránulos de almidón están nativos, hay mayor cristalinidad en los gránulos, también contiene antinutrientes y todo esto reduce el IG (Angioloni *et al.*, 2012b; Chung *et al.*, 2006), lo cual explica el menor IG en el pan natural. En las harinas con las que se elaboró el pan con tratamiento, al ya haber pasado por un proceso térmico que ha gelatinizado gránulos de almidón, éstos se hacen más susceptibles a hidrólisis, lo cual resulta en un mayor IG.

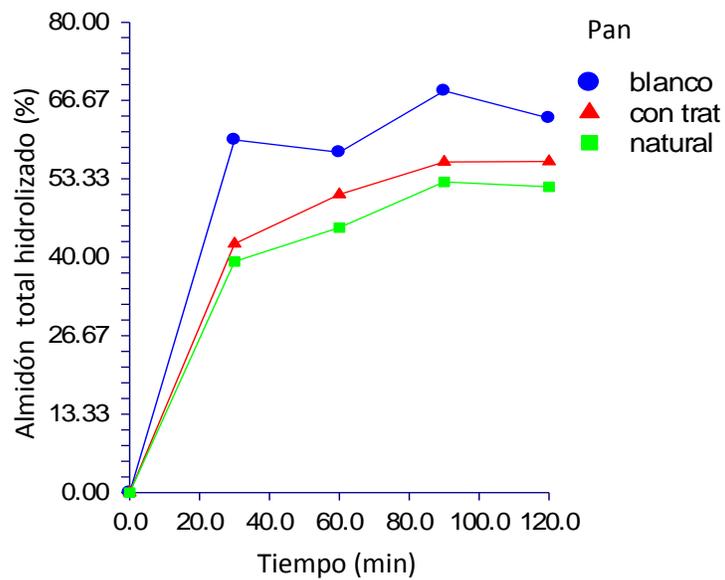


Figura 13. Hidrólisis enzimática de panes multigrano

Finalmente, comparado con el pan blanco, se logró una disminución de 19.2 y 15.62 % del IG en el pan natural y con tratamiento, respectivamente. Sin embargo, tanto el pan natural como el pan con tratamiento caen dentro de la clasificación de alimento de alto IG (≥ 70). No obstante, aunque en los estudios revisados se logró una mayor disminución de IG en los productos obtenidos, la reducción no fue suficiente para obtener productos de panificación que clasificaran como de moderado o bajo IG. Por tanto, considerando que la formulación utilizada en este estudio, sólo contiene un 19 % de leguminosas, mientras que en los otros estudios utilizan el doble o más de estos granos, el resultado obtenido se encuentra en congruencia con lo reportado. El tratamiento de nixtamalización y choque térmico dado a los granos finalmente no tuvo efecto significativo en disminuir la hidrólisis de almidón en el producto final comparado con los granos sin ningún tratamiento. Sin embargo, la utilización de harinas de leguminosas sin ningún tratamiento térmico podría resultar en un menor aprovechamiento de nutrientes, ya que los granos de leguminosas sin tratamiento térmico contienen antinutrientes que reducen la digestibilidad y absorción de nutrientes entre ellos las proteínas, por lo que su uso en crudo no es recomendable.

VII. CONCLUSIÓN

Se evaluó el efecto de la nixtamalización con choque térmico en los granos, en las harinas multigrano y en el producto elaborado con ellas y se concluye que la nixtamalización con choque térmico tanto a temperatura ambiente como a ~ 1 °C resulta en modificaciones al comportamiento de las propiedades viscoamilográficas del almidón y su capacidad de retrogradar, aunque finalmente no mejoraron la funcionalidad de las harinas pero si el contenido de almidón resistente de las mismas y en el pan multigrano elaborado a partir de ellas. Sin embargo, esto no causó un efecto significativo en la reducción del índice glucémico y aunque no se logró que clasificara como alimento de moderado IG, se logró reducirlo en un promedio de 17.4 % comparado con el pan blanco, esto sin comprometer demasiado la calidad del pan y sin el uso de aditivos. Además la incorporación de harinas de distintas fuentes (trigo, garbanzo, avena, maíz y aislado proteico de soya) mejoraron la composición química de los panes multigrano elaborados a partir de ellas, por lo que de igual forma representa una mejor opción de consumo que el pan blanco.

IX. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos, se sugiere evaluar periodos más largos de choque térmico u otras modificaciones en el proceso para lograr mayor retrogradación. Adicionalmente, la utilización de aditivos podría permitir mayor nivel de sustitución de harina de trigo con harinas de otras fuentes como las leguminosas y así obtener pan con mayor valor de volumen específico de tal manera que se asemeje más al de pan blanco y reducir en mayor proporción el índice glucémico. Además es relevante evaluar otros aspectos nutricionales que el pan multigrano podría proporcionar al consumidor, como lo son, el contenido de compuestos antioxidantes o fitoquímicos, que se han visto asociados con beneficios a la salud.

Por otro lado, también resulta de interés evaluar a profundidad el efecto de la nixtamalización en el grano garbanzo y trigo. Así como la relación entre el efecto de la nixtamalización en el grano con calidad del pan obtenido a partir de esas harinas. Así mismo, el uso potencial de harinas obtenidas a partir de estos granos nixtamalizados en otros productos de panificación como galletas o barras y el efecto en la calidad nutricional.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AACC. (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, method 55-10 (hectolitic weight), method 44-15.01 (moisture in bread), method 44-15,02 (moisture), method 08-01,01 (ash), method 46-13,01 (protein), method 30-20,01 (fat), method 54-40.02 (mixograph), method 32-40,01 (resistant starch) & method 10-10.03 (baking test)*. (10th ed.). St. Paul, MN.: American Association of Cereal Chemists.
- AACC. (2013). Dietary fiber. Accesado el 21 de Mayo, 2013 de <http://www.aaccnet.org/initiatives/definitions/Pages/DietaryFiber.aspx>
- Åkerberg, A., Liljeberg, H., & Björck, I. (1998). Effects of amylose/amylopectin ratio and baking conditions on resistant starch formation and glycaemic indices. *Journal of Cereal Science*, 28(1), 71-80.
- Anderson, G. H., & Woodend, D. (2003). Effect of glycemic carbohydrates on short-term satiety and food intake. *Nutrition Reviews*, 61(1), S17-S26. doi:10.1301/nr.2003.may.S17-S26.
- Anderson, J. W., Randles, K. M., Kendall, C. W., & Jenkins, D. J. (2004). Carbohydrate and fiber recommendations for individuals with diabetes: a quantitative assessment and meta-analysis of the evidence. *Journal of the American College of Nutrition*, 23(1), 5-17.
- Angioloni, A., & Collar, C. (2011). Polyphenol composition and “*in vitro*” antiradical activity of single and multigrain breads. *Journal of Cereal Science*, 53(1), 90-96. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2010.10.002>.
- Angioloni, A., & Collar, C. (2012a). Effects of pressure treatment of hydrated oat, finger millet and sorghum flours on the quality and nutritional properties of composite wheat breads. *Journal of Cereal Science*, 56(3), 713-719.

- Angioloni, A., & Collar, C. (2012b). High legume-wheat matrices: an alternative to promote bread nutritional value meeting dough viscoelastic restrictions. *European Food Research and Technology*, 234(2), 273-284.
- Angioloni, A., & Collar, C. (2013). Suitability of oat, millet and sorghum in breadmaking. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1486-1493.
- Antuna-Grijalva, O., Rodríguez-Herrera, S. A., Arámbula-Villa, G., Palomo-Gil, A., Gutiérrez-Arías, E., Esponosa-Banda, A., Navarro-Orona, E. F., & Andrio-Enríquez, E. (2008). Calidad nixtamalera y tortillera en maíces criollos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(No. especial 3), 23-27.
- Arámbula-Villa, G., Barrón-Avila, L., Hernández-González, M., Martínez-Moreno, E., & Bárcenas-Luna, G. (2001a). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51(2), 187-194.
- Arámbula-Villa, G., González-Hernández, J., & Ordorica-Falomir, C. A. (2001b). Physicochemical, structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour supplemented with various types of corn lipids. *Journal of Cereal Science*, 33(3), 245-252. doi:<http://dx.doi.org/10.1006/jcrs.2001.0372>.
- Badui-Dergal, S. (1999). *Química de los Alimentos*. México: Addison Wesley Longman de México S.A de C.V.
- Bakare, H. A., Osundahunsi, O. F., Adegunwa, M. O., & Olusanya, J. O. (2013). Batter rheology, baking, and sensory qualities of cake from blends of breadfruit and wheat flours. *Journal of Culinary Science & Technology*, 11(3), 203-221.
- Becker, A., Hill, S. E., & Mitchell, J. R. (2001). Relevance of amylose-lipid complexes to the behaviour of thermally processed starches. *Starch*, 53(3-4), 121-130. doi:10.1002/1521-379x(200104)53:3/4<121::aid-star121>3.0.co;2-q.
- BeMiller, J. N. (2007). *Carbohydrate Chemistry for Food Scientist* (Segunda ed.). St. Paul, Minesota, E.U.A.: AACC International.

- Bertsias, G., Mammias, I., Linardakis, M., & Kafatos, A. (2003). Overweight and obesity in relation to cardiovascular disease risk factors among medical students in Crete, Greece. *BMC Public Health*, 3(1), 1-9. doi:10.1186/1471-2458-3-3.
- Billeb de Sinibaldi, A. C., & Bressani, R. (2001). Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 5(1), 86-94.
- Botero, D., Ebbeling, C. B., Blumberg, J. B., Ribaya-Mercado, J. D., Creager, M. A., Swain, J. F., Feldman, H. A., & Ludwig, D. S. (2009). Acute effects of dietary glycemic index on antioxidant capacity in a nutrient. Controlled feeding study. *Obesity*, 17(9), 1664-1670.
- Bourne, M. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement* (Segunda ed.): Academic Press.
- Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43(2), 414-431. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>.
- Brand-Miller, J., Hayne, S., Petocz, P., & Colagiuri, S. (2003). Low-glycemic index diets in the management of diabetes: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Diabetes Care*, 26(8), 2261-2267. doi:10.2337/diacare.26.8.2261.
- Bravo, L., Siddhuraju, P., & Saura-Calixto, F. (1999). Composition of underexploited Indian pulses. Comparison with common legumes. *Food Chemistry*, 64(2), 185-192. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00140-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00140-X).
- Bressani, R. (1995). Nixtamalización del maíz. En F. Boucher & J. Muchnik (Eds.), *Agroindustria Rural. Recursos Técnicos y Alimentación*. (pp. 67-69). Bogotá, Colombia: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Brites, C. M., Trigo, M. J., Carrapiço, B., Alviña, M., & Bessa, R. J. (2011). Maize and resistant starch enriched breads reduce postprandial glycemic responses in rats. *Nutrition Research*, 31(4), 302-308.

- Brown, A. (2011). *Understanding Food: Principles & Preparation* (Cuarta ed.). Belmont, Estados Unidos de América: Wadsworth Cengage Learning.
- Cauvain, S. P., & Young, L. S. (2008). *Productos de Panadería: Ciencia, Tecnología y Práctica*. Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Clavijo, Z. (2009). Aspects to relationship between obesity and hypertension. *The International Journal of Medicine and Science in Physical Education and Sport*, 5(1), 49-58.
- CODEx-STAN-154. (1985). *Norma del codex para la harina integral de maíz* Codex Alimentarius.
- CODEx-STAN-178. (1991). *Norma del codex para la sémola y la harina de trigo duro*. Codex Alimentarius.
- Cornejo-Villegas, M. d. I. Á., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Del Real-López, A., Luz Zambrano-Zaragoza, M. d. I., Martínez-Vega, V., & Rodríguez-García, M. E. (2013). Physicochemical, morphological, and pasting properties of nixtamalized flours from quality protein maize and its particle distribution. *Food Science and Technology*, 53(1), 81-87. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.023>.
- Charley, H. (2012). *Tecnología de Alimentos: Procesos Químicos y Físicos en la Preparación de Alimentos*. México D.F, México: Editorial Limusa.
- Chawia, R., & Patil, G. R. (2010). Soluble dietary fibre. *Institute of Food Technologists*, 9(1), 178-196.
- Chung, H.-J., Lim, H. S., & Lim, S.-T. (2006). Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. *Journal of Cereal Science*, 43(3), 353-359.
- Chung, H.-J., Liu, Q., Hoover, R., Warkentin, T. D., & Vandenberg, B. (2008). In vitro starch digestibility, expected glycemic index, and thermal and pasting properties of flours from pea, lentil and chickpea cultivars. *Food Chemistry*, 111(2), 316-321. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.062>.

- Dendy, D. A. V. (2001). Harinas compuestas y alternativas. En D. A. V. Dendy & B. J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología* (pp. 324,326-328). Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Dewettinck, K., Van Bockstaele, F., Kühne, B., Van de Walle, D., Courtens, T. M., & Gellynck, X. (2008). Nutritional value of bread: Influence of processing, food interaction and consumer perception. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 243-257. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2008.01.003>.
- Dobraszczyk, B. J. (2001). Trigo y harina. En D. A. V. Dendy & B. J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología* (pp. 127, 143, 144). Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Dobraszczyk, B. J., Campbell, G. M., & Gan, Z. (2001). Pan: un alimento único. En D. A. V. Dendy & B. J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología* (pp. 223). Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Ebbeling, C. B., Leidig, M. M., Feldman, H. A., Lovesky, M. M., & Ludwig, D. S. (2007). Effects of a low-glycemic load vs low-fat diet in obese young adults: A randomized trial. *Journal of the American Medical Association*, 297(19), 2092-2102. doi:10.1001/jama.297.19.2092.
- Edema, M. O., Sanni, L. O., & Sanni, A. I. (2005). Evaluation of maize-soybean flour blends for sour maize bread production in Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 4(9), 911-918.
- Eliasson, A. C., & Tatham, A. (2001). Almidones y proteínas de los cereales. En D. A. V. Dendy & B. J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología* (pp. 87, 89, 90). Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- Englyst, H. N., & Hudson, G. J. (1996). The classification and measurement of dietary carbohydrates. *Food Chemistry*, 57(1), 15-21. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146\(96\)00056-8](http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146(96)00056-8).
- Englyst, K., Liu, S., & Englyst, H. (2007). Nutritional characterization and measurement of dietary carbohydrates. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(1), S19-S39.

- ENSANUT. (2012). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición. Síntesis Ejecutiva*. México D.F, México: Instituto Nacional de Salud Pública y Secretaría de Salud.
- Fenn, D., Lukow, O. M., Humphreys, G., Fields, P. G., & Boye, J. I. (2010). Wheat-legume composite flour quality. *International Journal of Food Properties*, *13*, 381-393.
- Fernández-Muñoz, J. L., Rojas-Molina, I., González-Dávalos, M. L., Leal, M., Valtierra, M. E., Martín-Martínez, E. S., & Rodríguez, M. E. (2004). Study of calcium ion diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry Journal*, *81*(1), 65-69. doi:10.1094/cchem.2004.81.1.65.
- Fernández-Muñoz, J. L., Rodríguez, M. E., Pless, R. C., Martínez-Flores, H. E., Leal, M., Martínez, J. L., & Baños, L. (2002). Changes in nixtamalized corn flour dependent on postcooking steeping time. *Cereal Chemistry*, *79*(1), 162-166.
- Figueroa-Cárdenas, J. D., Narváez-González, D. E., Mauricio-Sánchez, A., Taba, S., Gaytán-Martínez, M., Vález-Medina, J. J., Rincón-Sánchez, F., & Aragón-Cuevas, F. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *36*(3-A), 305-314.
- Flores-Farías, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., Chang, Y. K., González-Hernández, J., & Ríos, E. (2000). Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalized mexican maize flour for tortillas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*, 657-664.
- Ford, E. S., & Liu, S. (2001). Glycemic index and serum high-density lipoprotein cholesterol concentration among U.S. adults. *Archives of Internal Medicine*, *161*(4), 572-576. doi:10.1001/archinte.161.4.572.
- García-Villanova, B., & Guerra-Hernández, E. (2010). Cereales y productos derivados. En Á. Gil (Ed.), *Tratado de Nutrición* (Vol. Tomo II, pp. 105, 133). España: Editorial médica panamericana.

- Gómez, M., Oliete, B., Rosell, C. M., Pando, V., & Fernández, E. (2008). Studies on cake quality made of wheat–chickpea flour blends. *Food Science and Technology*, 41(9), 1701-1709. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.024>.
- Gomez, M. H., Waniska, R. D., & Rooney, L. W. (1991a). Lime cooking and steeping of corn masa. *Cereal Foods World*, 36, 704.
- Gomez, M. H., Waniska, R. D., & Rooney, L. W. (1991b). Starch characterization of nixtamalized corn flour. *Cereal Chemistry*, 68(6), 578-582.
- González-Torres, L., Téllez-Valencia, A., Sampedro, J. G., & Nájera, H. (2007). Las proteínas en la nutrición. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 8(2).
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17(3), 427-437.
- Granfeldt, Y., Drews, A., & Björck, I. (1995). Arepas made from high amylose corn flour produce favorably low glucose and insulin responses in healthy humans. *The Journal of Nutrition*, 125(3), 459-465.
- Gularte, M. A., Gómez, M., & Rosell, C. M. (2012). Impact of legume flours on quality and *in vitro* digestibility of starch and protein from gluten-free cakes. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 3142-3150.
- Gutiérrez-Uribe, J. A., Rojas-García, C., García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2010). Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 410-416. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2010.07.003>.
- Güzel, D., & Sayar, S. (2012). Effect of cooking methods on selected physicochemical and nutritional properties of barlotto bean, chickpea, faba bean, and white kidney bean. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 89-95.
- Halverson, J., & Zeleny, L. (1988). Criteria of wheat quality. En Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat Chemistry and Technology* (pp. 15-24). St. Paul, Minnesota, E.U.A.: American Association of Cereal Chemists.

- Hirsch, S., Barrera, G., Leiva, L., de la Maza, M. P., & Bunout, D. (2010). Índice glicémico e insulinémico de dos tipos de pasta de presentación larga y corta en individuos sanos. *Revista Chilena de Nutrición*, 37(4), 474-479.
- Hoover, R., & Zhou, Y. (2003). *In vitro* and *in vivo* hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes—a review. *Carbohydrate Polymers*, 54(4), 401-417. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00180-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00180-2).
- Hoseney, R. C. (1998). *Principles of Cereal Science and Technology* (Segunda ed.). St. Paul, MN, Estado Unidos de América: American Association of Cereal Chemists.
- Hughes, T., Hoover, R., Liu, Q., Donner, E., Chibbar, R., & Jaiswal, S. (2009). Composition, morphology, molecular structure, and physicochemical properties of starches from newly released chickpea (*Cicer arietinum L.*) cultivars grown in Canada. *Food Research International*, 42(5), 627-635.
- Indrani, D., Soumya, C., & Venkateswara Rao, G. (2010). Multigrain bread—its dough rheology, microstructure, quality and nutritional characteristics. *Journal of Texture Studies*, 41(3), 302-319.
- Indrani, D., Swetha, P., Soumya, C., Rajiv, J., & Venkateswara Rao, G. (2011). Effect of multigrains on rheological, microstructural and quality characteristics of north Indian parotta – An Indian flat bread. *Food Science and Technology*, 44(3), 719-724. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.017>.
- Jayakody, L., & Hoover, R. (2008). Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins – A review. *Carbohydrate Polymers*, 74(3), 691-703. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.04.032>.
- Jenkins, D., Kendall, C. C., McKeown-Eyssen, G., McKeown-Eyssen, G., Josse, R. G., Silverberg, J., Booth, G. L., Vidgen, E., Josse, A. R., Nguyen, T. H., Corrigan, S., Banach, M. S., Ares, S., Mitchell, S., Emam, A., Augustin, L. S. A., Parker, T. L., & Leiter, L. A. (2008). Effect of a low-glycemic index or a high-cereal fiber diet on

- type 2 diabetes: A randomized trial. *Journal of the American Medical Association*, 300(23), 2742-2753. doi:10.1001/jama.2008.808.
- Jenkins, D. J., Kendall, C. W., Augustin, L. S., Franceschi, S., Hamidi, M., Marchie, A., Jenkins, A. L., & Axelsen, M. (2002). Glycemic index: overview of implications in health and disease. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76(1), 266S-273S.
- Jenkins, D. J., Vuksan, V., Kendall, C. W., Würsch, P., Jeffcoat, R., Waring, S., Mehling, C. C., Vidgen, E., Augustin, L. S., & Wong, E. (1998). Physiological effects of resistant starches on fecal bulk, short chain fatty acids, blood lipids and glycemic index. *Journal of the American College of Nutrition*, 17(6), 609-616.
- Jenkins, D. J., Wolever, T. M., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., Bowling, A. C., Newman, H. C., Jenkins, A. L., & Goff, D. V. (1981). Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *American Journal of Clinical Nutrition*, 34(3), 362-366.
- Jiménez-Juárez, J. A., Arámbula-Villa, G., Cruz-Lázaro, E. C., & Aparicio-Trapala, M. A. (2012). Característica del grano, masa y tortilla producida con diferentes genotipos de maíz del trópico mexicano. *Universidad y Ciencia*, 22(2), 145-152.
- Kent, N. L. (1984). *Technology of cereals* (Tercera ed.). Oxford: Pergamon Press.
- Kent, N. L., & Evers, A. D. (1994). *Technology of Cereals* (Cuarta ed.). Reino Unido: Elsevier Science Ltd.
- Khatkar, B. S. (2009). *Functionality of Wheat Flour Components & Bakery Ingredients*. Hisa-Haryana, India: Guru Jambheshwar University of Science and Technology.
- Kihlberg, I., Johansson, L., Kohler, A., & Risvik, E. (2004). Sensory qualities of whole wheat pan bread—influence of farming system, milling and baking technique. *Journal of Cereal Science*, 39(1), 67-84. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00067-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00067-5).
- Kim, J. H., Tanhehco, E. J., & Ng, P. K. W. (2006). Effect of extrusion conditions on resistant starch formation from pastry wheat flour. *Food Chemistry*, 99(4), 718-723. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.08.054>.

- Knights, E. J. (2004). Chickpea. In C. Wrigley, H. Corke & C. E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science* (Vol. I, pp. 280-282, 285-286): Elsevier.
- Koehler, P., & Wieser, H. (2013). Chemistry of cereal grains. En M. Gobbetti & M. Gänzle (Eds.), *Handbook on Sourdough Biotechnology*. Nueva York, Estados Unidos de América: Springer Science.
- Kristo, A., Matthan, N., & Lichtenstein, A. (2013). Effect of diets differing in glycemic index and glycemic load on cardiovascular risk factors: review of randomized controlled-feeding trials. *Nutrients*, 5(4), 1071-1080.
- Ktenioudaki, A., & Gallagher, E. (2012). Recent advances in the development of high-fibre baked products. *Trends in Food Science & Technology*, 28(1), 4-14. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.004>.
- Lazarim, F. L., Stancanelli, M., Brenzikofer, R., & de Macedo, D. V. (2009). Understanding the glycemic index and glycemic load and their practical applications. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 37(5), 296-300. doi:10.1002/bmb.20314.
- Liljeberg, H., Åkerberg, A., & Björck, I. (1996). Resistant starch formation in bread as influenced by choice of ingredients or baking conditions. *Food Chemistry*, 56(4), 389-394. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00199-9](http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146(95)00199-9).
- Lunn, J., & Buttriss, J. L. (2007). Carbohydrates and dietary fibre. *British Nutrition Foundation*, 32(1), 21-64.
- Martínez-Bustos, F., Martínez-Flores, H. E., Sanmartín-Martínez, E., Sánchez-Sinencio, F., Chang, Y. K., Barrera-Arellano, D., & Ríos, E. (2001). Effect of the components of maize on the quality of masa and tortillas during the traditional nixtamalization process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, 1455-1462.
- Mataix-Verdú, J., & Carazo-Marín, E. (2005). *Nutrición para Educadores*. Madrid, España: Diaz de Santos.
- Méndez-Montevalvo, G., García-Suárez, F. J., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological

- characteristics of maize starch. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 420-425. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2007.10.007>.
- Miao, M., Zhang, T., & Jiang, B. (2009). Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China. *Food Chemistry*, 113(4), 1025-1032.
- Miñarro, B., Albanell, E., Aguilar, N., Guamis, B., & Capellas, M. (2012). Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 476-481. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2012.04.012>.
- Mirza, N. M., Klein, C. J., Palmer, M. G., McCarter, R., He, J., Ebbeling, C. B., Ludwig, D. S., & Yanovski, J. A. (2011). Effects of high and low glycemic load meals on energy intake, satiety and hunger in obese hispanic-american youth. *International Journal of Pediatric Obesity*, 6(2), e523-e531.
- Mohammed, I., Ahmed, A. R., & Senge, B. (2012). Dough rheology and bread quality of wheat–chickpea flour blends. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 196-202.
- Mondragón, M., Mendoza-Martínez, A. M., Bello-Pérez, L. A., & Peña, J. L. (2006). Viscoelastic behavior of nixtamalized maize starch gels. *Carbohydrate Polymers*, 65(3), 314-320. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.01.011>.
- Morales-Gómez, J. A., & Durón-Noriega, L. J. (2004). Aspectos generales. En J. A. Morales-Gómez, L. J. Durón-Noriega, G. Martínez-Días, J. H. Núñez-Moreno & A. A. Fu-Castillo (Eds.), *El Cltivo de Garbanzo Blanco en Sonora* (Vol. Libro técnico No. 6, pp. 11-12). Hermosillo, México: INIFAP/SAGARPA.
- NMX-FF-034/1-SCFI. (2002). *Productos alimenticios no industrializados para consumo humano -Cereales- Parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado- Especificaciones y métodos de prueba*. México DF, México: Secretaría de Economía.
- NMX-FF-036. (1996). *Productos alimenticios no industrializados. Cereales. Trigo (Triticum aestivium y Triticum durum desf.) especificaciones y métodos de prueba*. México Df, México: Dirección general de normas.

- NOM-051-SCFI/SSA1. (2010). *Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-Información comercial y sanitaria*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial y Secretaría de Salud.
- NOM-247-SSA1. (2008). *Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba*. Secretaría de Salud.
- Oomah, B. D., Patras, A., Rawson, A., Singh, N., & Compos-Vega, R. (2011). Chemistry of pulses. En B. Tiwari, K., A. Gowen & B. McKenna (Eds.), *Pulse Foods. Processing, Quality and Nutraceutical Applications* (pp. 9-31y 371-372). E.U.A: Academic Press/ Elsevier.
- Peña-Bautista, R. J., Pérez-Herrera, P., Villaseñor, E., & Gómez-Valdez, m. M., Mendoza-Lozano, M.A. (2008). *Calidad de la Cosecha de Trigo en México. Ciclo Primavera-Verano 2006*. México D.F, México: CONASIST-CONATRIGO.
- Pereira, M. A., Jacobs, D. R., Pins, J. J., Raatz, S. K., Gross, M. D., Slavin, J. L., & Seaquist, E. R. (2002). Effect of whole grains on insulin sensitivity in overweight hyperinsulinemic adults. *American Journal of Clinical Nutrition*, 75(5), 848-855.
- Perera, A., Meda, V., & Tyler, R. (2010). Resistant starch: A review of analytical protocols for determining resistant starch and factors affecting the resistant starch content of foods. *Food Research International*, 43(8), 1959-1974.
- Pittaway, J. K., Robertson, I. K., & Ball, M. J. (2008). Chickpeas may influence fatty acid and fiber intake in an *ad libitum* diet, leading to small improvements in serum lipid profile and glycemic control. *Journal of the American Dietetic Association*, 108(6), 1009-1013. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jada.2008.03.009>.
- Quintanar-Guzmán, A., Jaramillo-Flores, M. E., Mora-Escobedo, R., Chel-Guerrero, L., & Solorza-Feria, J. (2009). Changes on the structure, consistency, physicochemical and viscoelastic properties of corn (*Zea mays* sp.) under different

- nixtamalization conditions. *Carbohydrate Polymers*, 78(4), 908-916. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.024>.
- Quintanar-Guzmán, A., Jaramillo-Flores, M. E., Solorza-Feria, J., Méndez-Montealvo, M. G., & Wang, Y.-J. (2011). Rheological and thermal properties of masa as related to changes in corn protein during nixtamalization. *Journal of Cereal Science*, 53(1), 139-147. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2010.11.005>.
- Rachwat, D., Nebesny, E., & Budryn, G. y. (2013). Chickpeas-composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*(just-accepted).
- Ragaei, S., & Abdel-Aal, E.-S. M. (2006). Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry*, 95(1), 9-18. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.012>.
- Ramírez-Wong, B., Sweat, V. E., Torres, P. I., & Rooney, L. W. (1994). Cooking time, grinding and moisture content effect on fresh corn masa texture. *Cereal Chemistry*, 71(4), 337-343.
- Reyna-Villasmil, N., Bermúdez-Pirela, V., Mengual-Moreno, E., Arias, N., Cano-Ponce, C., Leal-Gonzalez, E., Souki, A., Inglett, G. E., Israili, Z. H., Hernández-Hernández, R., Valasco, M., & Arraiz, N. (2007). Oat-derived [beta]-glucan significantly improves HDLC and diminishes LDLC and non-HDL cholesterol in overweight individuals with mild hypercholesterolemia. *American Journal of Therapeutics*, 14(2), 203-212.
- Robles, R. R., Murray, E. D., & Paredes-López, O. (1998). Physicochemical changes in maize starch during the lime-heat treatment for tortilla making. *International Journal of Food Science and Technology*, 29, 91-98.
- Ros-Berruendo, G., Periago-Castón, M. J., & Pérez-Conesa, D. (2010). Legumbres, verduras y productos hortícolas. En Á. Gil (Ed.), *Tratado de Nutrición* (Segunda ed., Vol. Tomo II pp. 157, 160, 165). Madrid, España: Editorial Médica panamericana.

- Ruiz-Gutierrez, M. G., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., Lardizábal-Gutiérrez, D., Barnard, J., Márquez-Melendez, R., & Talamás-Abbud, R. (2010). Changes in mass transfer, thermal and physicochemical properties during nixtamalization of corn with and without agitation at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, *98*, 76-83.
- Rutledge, J. H. (1978). *The value of corn quality to the dry miller*. Paper presented at the Proceedings of the Corn quality Conference, Urbana, IL, EUA.
- Sahai, D., Buendia, M. O., & Jackson, D. S. (2001). Analytical techniques for understanding nixtamalized corn flour: Particle size and functionality relationships in masa flour sample. *Cereal Chemistry*, *78*(1), 14-18.
- Salehifar, M., & Shahedi, M. (2007). Effects of oat flour on dough rheology, texture and organoleptic properties of taftoon bread. *Journal of Agriculture Science and Technology*, *9*, 227-234.
- Sandhu, K. S., & Lim, S.-T. (2008). Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. *Carbohydrate Polymers*, *71*(2), 245-252.
- Sefa-Dedeh, S., Cornelius, B., Sakyi-Dawson, E., & Afoakwa, E. O. (2004). Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry*, *86*(3), 317-324.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.08.033>.
- Serna-Saldívar, S. (2003). *Manufactura y Control de Calidad de Productos Basados en Cereales*. México D.F, México: AGT editor, S.A.
- Serna-Saldívar, S. O., Gomez, M. H., Almeida-Dominguez, H. D., Islas-Rubio, A., & Rooney, L. W. (1993). A method to evaluate the lime-cooking properties of corn (*Zea mays*). *Cereal Chemistry*, 762-764.
- Serna-Saldívar, S. R. O. (1996). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales*. México D.F., México: AGT Editores.
- Serra-Majem, L., & Raido-Quintana, B. (2010). Consumo de pan en el mundo y en España. En Á. Gil-Hernández & L. Serra-Majem (Eds.), *Libro Blanco del Pan* (pp. 65-66). Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.

- Silvera, S. A. N., Jain, M., Howe, G. R., Miller, A. B., & Rohan, T. E. (2005). Dietary carbohydrates and breast cancer risk: a prospective study of the roles of overall glycemic index and glycemic load. *International Journal of Cancer*, *114*(4), 653-658.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh Sodhi, N., & Singh Gill, B. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, *81*(2), 219-231. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00416-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8).
- Singh, N., Singh Sandhu, K., & Kaur, M. (2004). Characterization of starches separated from Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Journal of Food Engineering*, *63*(4), 441-449.
- Slavin, J. (2003). Why whole grains are protective: biological mechanisms. *Proceedings of the Nutrition Society*, *62*(01), 129-134.
- Sotelo, A., Argote, R. M., Cornejo, L., Escalona, S., Ramos, M., Nava, A., Palomino, D., & Carreón, O. (2008). Medición de fibra dietética y almidón resistente reto para alumnos del laboratorio de desarrollo experimental de alimentos. *Educación Química*, *1*(19), 42-49.
- Sotelo, A., Flores, F., & Hernández, M. (1987). Chemical composition and nutritional value of Mexican varieties of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant Foods for Human Nutrition*, *37*, 299-306.
- Tester, R. F., Debon, S. J. J., & Karkalas, J. (1998). Annealing of wheat starch. *Journal of Cereal Science*, *28*(3), 259-272. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0733-5210\(98\)90006-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0733-5210(98)90006-6).
- Townsend, G. M. (2001). Productos de confitería. En D. A. V. Dendy & B. J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología* (pp. 285, 287, 293 y 294). Zaragoza, España: Editorial Acibia.
- Trough, I., Courtin, C. M., Andersson, A. A. M., Aman, P., Sorensen, J. F., & Delcour, J. A. (2004). The combined use of hull-less barley flour and xylanase as a strategy for

- wheat/hull-less barley flour breads with increased arabinoxylan and (3→1, 1→4)-β-D-glucan levels. *Journal of Cereal Science*, 40(1), 257-267.
- Utrilla-Coello, R., Osorio-Díaz, P., & Bello-Pérez, L. (2007). Alternative use of chickpea flour in breadmaking: chemical composition and starch digestibility of bread. *Food Science and Technology International*, 13(4), 323-327.
- Wang, N., Hatcher, D. W., Tyler, R. T., Toews, R., & Gawalko, E. J. (2010). Effect of cooking on the composition of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpeas (*Cicer arietinum* L.). *Food Research International*, 43(2), 589-594. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.012>.
- Wang, S., Wang, J., Yu, J., & Wang, S. (2014). A comparative study of annealing of waxy, normal and high-amylose maize starches: The role of amylose molecules. *Food Chemistry*, 164(0), 332-338. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.055>.
- Wasserman, L. A., Signorelli, M., Schiraldi, A., Yuryev, V., Boggini, G., Bertini, S., & Fessas, D. (2007). Preparation of wheat resistant starch. Treatment of gels and DSC characterization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 87(1), 153-157.
- Welch, R. W., & McConnell, J. M. (2001). Avena. En D. A. V. Dendy & B. J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología* (pp. 457, 460, 461). Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- WHO. (2014). Obesidad y sobrepeso. *Nota descriptiva No.311*. Accesado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/es/>
- WHO/FAO. (2003). Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Disease. *WHO Technical Report Series*, 916.
- Whole-Grain-Council. (2011). How much is Enough? Accesado el 03 de Septiembre, 2014, Boston, Massachusetts, EUA. de <http://wholegrainscouncil.org/whole-grains-101/how-much-is-enough>
- Willett, W., Manson, J., & Liu, S. (2002). Glycemic index, glycemic load, and risk of type 2 diabetes. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76(1), 274S-280S.

- Yach, D. (2005). Globalization and Health: Exploring the opportunities and constraints for health arising from globalization. *Globalization and Health*, 1(1), 1-18. doi:10.1186/1744-8603-1-2.
- Zhang, M., Bai, X., & Zhang, Z. (2011). Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *Journal of Cereal Science*, 54(1), 98-103. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.001>.